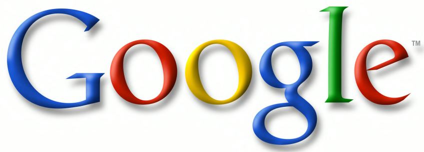
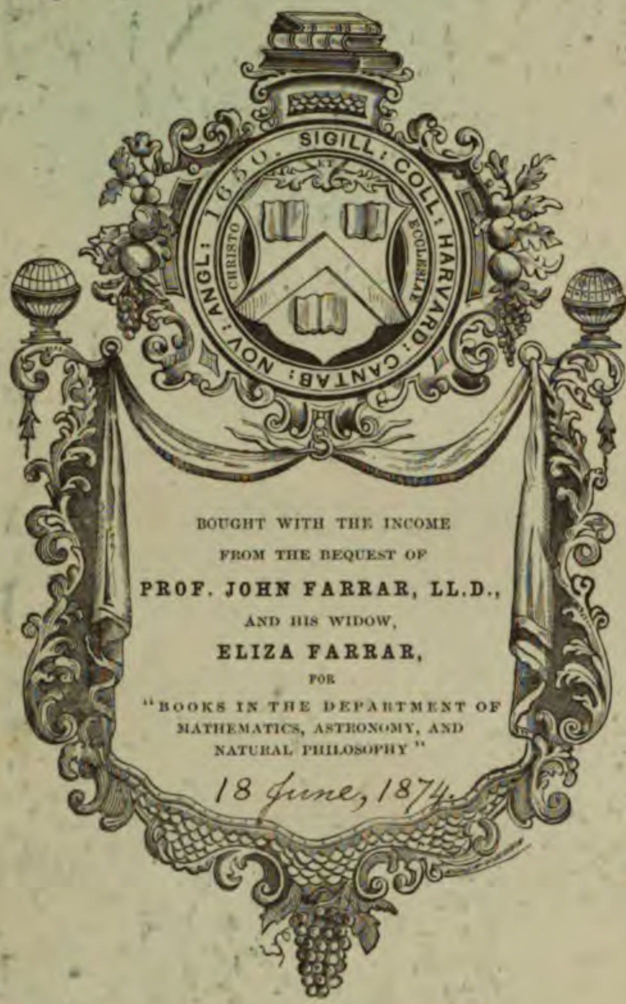
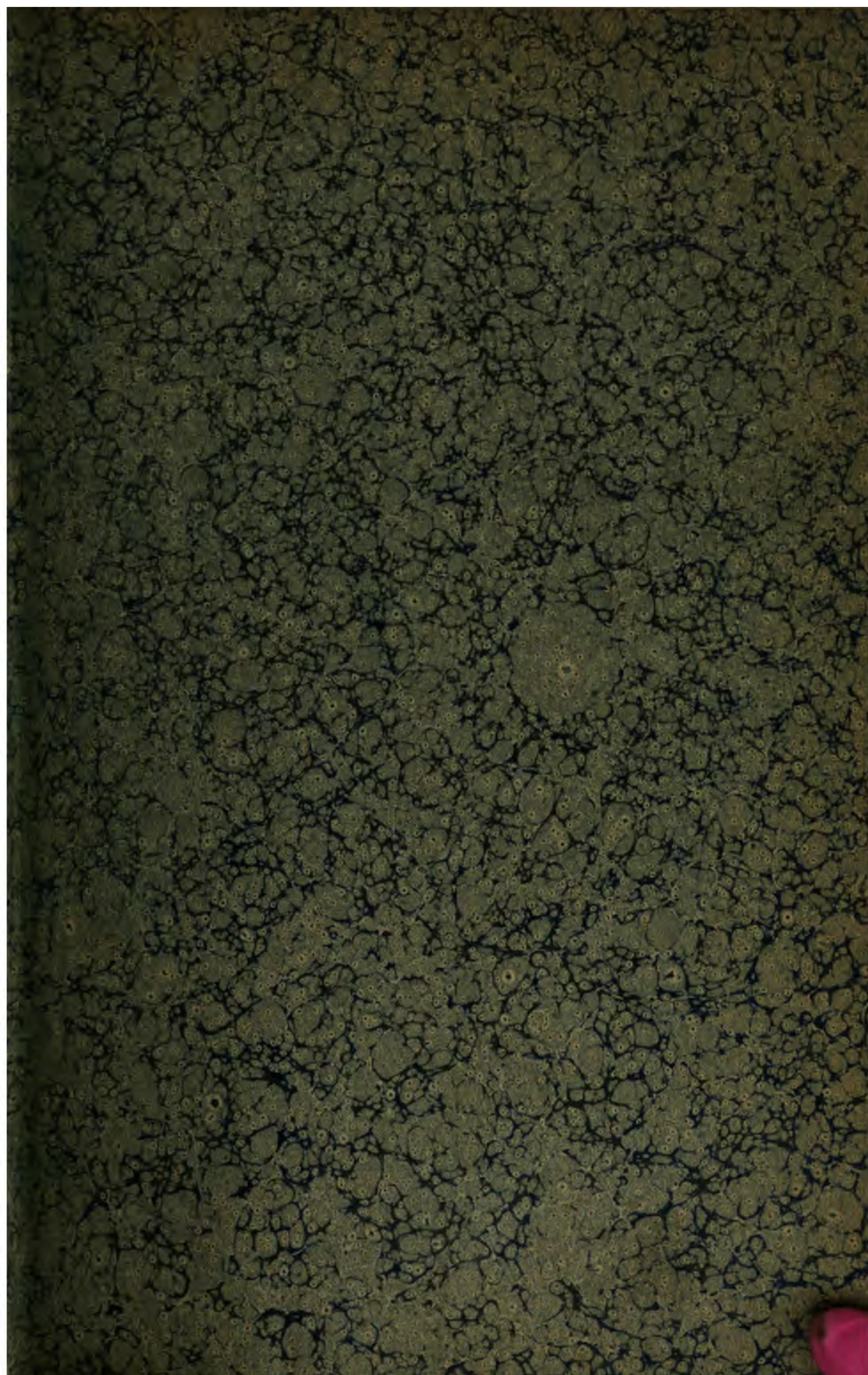

Google




SIGILL: COLL: HARVARD: CANTAB: NOV: ANGL: 1650.
CHRISTO ET ECCLESIAE



LES APPLICATIONS

DE LA PHYSIQUE

AUX SCIENCES, A L'INDUSTRIE ET AUX ARTS

PARIS. — IMPRIMERIE DE E. MARTINET, RUE MIGNON, 2



G. Pouchet Invʳ Th. Deyrolle, pinxit. A. Pralon, Chromolith

LE MICROSCOPE

APPLIQUÉ A L'ÉTUDE DES MINÉRAUX

1. Cristaux du sang vus à un grossissement de 6 ou 700 diamètres. — 2. Cristal extrait des œufs de homard, 100 d. — 3. Cristaux de santonine, vus à la lumière polarisée, 50 d. — 4. Or mosaïque, 60 d. — 5. Cristaux de chlorhydrate d'ammoniaque, 100 d. — 6. Cristaux de sel marin, 100 d. — 7. Titane cristallisé, 60 d. — 8. Cristaux de bichromate de potasse, 100 d. — 9. Cuivre fibreux natif, 60 d

LES APPLICATIONS

DE LA PHYSIQUE

AUX SCIENCES, A L'INDUSTRIE ET AUX ARTS

PAR

AMÉDÉE GUILLEMIN

AUTEUR DES PHÉNOMÈNES DE LA PHYSIQUE ET DU CIEL

OUVRAGE CONTENANT

427 FIGURES DESSINÉES PAR B. BONNAFOUX ET A. JAHANDIER

ET GRAVÉES PAR CH. LAPLANTE

22 GRANDES PLANCHES DONT 6 IMPRIMÉES EN COULEUR

D'APRÈS LES DESSINS ET LES AQUARELLES DE CICERI, DEYROLLE ET FERAT

ET 3 CARTES

PARIS

LIBRAIRIE HACHETTE ET CIE

BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 79

1874

INTRODUCTION

I

J'ai essayé, dans un précédent ouvrage, de présenter sous une forme claire, accessible à tous, le tableau de ceux des phénomènes naturels que les savants ont rattachés à l'un des agents connus sous les noms de pesanteur, de chaleur, de lumière, de magnétisme et d'électricité. En décrivant ces phénomènes dans leur infinie variété, je me suis surtout efforcé d'en montrer le lien, d'en faire ressortir, sans étalage de chiffres ni de formules, les lois les plus simples et les plus générales. Les PHÉNOMÈNES DE LA PHYSIQUE avaient dès lors pour objectif principal la science pure, sans préoccupation de l'utilité qu'on en peut tirer et qu'on en tire en effet.

Je viens aujourd'hui compléter cet exposé de la science qu'on nomme la PHYSIQUE, en décrivant les plus remarquables de ses applications dans le triple domaine de l'Art, de l'Industrie et de la Science elle-même.

Les applications de la science! Qui pourrait en méconnaître aujourd'hui l'influence et la portée? Qui pourrait nier la part croissante que ces déductions pratiques de la théorie prennent au mouvement général de progrès qui entraîne les sociétés modernes? Partout, aujourd'hui, nous en trouvons autour de nous des exemples; partout, sous les formes les plus diverses, dans la vie privée, dans la vie publique, dans nos habitations, nos édifices, nous les voyons réalisées. Elles nous suivent dans nos actions de tous les jours, dans nos relations, nos réunions intimes, au foyer domestique, au théâtre, dans nos chemins de fer; nous les trouvons associées à nos joies, à nos douleurs. Dans la paix comme dans la guerre, elles jouent un rôle capital : ici, pour détruire toute force hostile, ou pour accroître nos éléments de défense et de résistance, elles sont les auxiliaires du patriotisme national ; là, toujours bienfaisantes et fécondes, c'est la production qu'elles favorisent en multipliant et perfectionnant les instruments de travail. Dans tous les cas, c'est notre propre existence qu'elles protégent ou dont elles améliorent les conditions.

Voulons-nous nous faire une idée vraiment saisissante de l'importance que les applications scientifiques ont acquise de nos jours, depuis seulement un ou deux siècles? Imaginons, par la pensée, que quelques-unes d'entre elles soient tout à coup réduites à néant, que nous soyons ramenés, pour les services qu'elles nous rendent, aux moyens primitifs dont disposaient nos pères avant qu'elles fussent entrées dans la pratique industrielle courante; puis examinons quelles perturbations résulteraient pour la société, comme pour chacun de nous, de cet anéantissement hypothétique, si une telle rétrogradation était possible.

Soit. Nous voilà revenus, je ne dirai pas au temps qui a précédé Papin et l'invention de la machine à vapeur, mais seule-

ment à l'époque où la machine nouvelle, à l'état d'embryon pour ainsi dire, était reléguée dans les mines du Cornouailles, attendant les transformations que lui a fait subir le génie de Watt. Des milliers d'usines, dont l'activité est pour les trois quarts empruntée au mouvement de l'incomparable moteur, sont fermées, ou du moins elles ont dû reprendre l'outillage primitif, celui qu'elles connaissaient seul quand elles étaient, dans le sens strictement grammatical du mot, de simples *manufactures* : c'est la main de l'ouvrier qui seule désormais va être obligée de façonner les mille objets, indispensables à nos besoins, que les machines à vapeur produisaient tantôt avec une si étonnante perfection, avec une rapidité si incroyable, et partant si économique.

Voit-on dans quelle proportion énorme la production industrielle va se trouver réduite du coup? Prenons pour exemple l'Angleterre. A cette heure, les machines à vapeur qui travaillent sur le sol anglais, dans les usines anglaises, ont une force mécanique totale qui ne représente pas moins de 76 millions d'ouvriers, au moins dix fois certainement la force musculaire de tous les travailleurs adultes qui sont, en Angleterre, comme les auxiliaires des machines. Où trouverait-on les bras capables de suppléer à cet immense labeur? Étendons l'exemple à toutes les nations travailleuses du globe, et nous pourrons juger de la disette d'objets manufacturés, d'étoffes, de vêtements, d'outils, de machines, de produits utiles de toute sorte qu'engendrerait la suppression résultant de notre hypothèse.

N'oublions pas, d'ailleurs, que les machines motrices, qui reçoivent leur mouvement de la force élastique de la vapeur, n'ont pas borné leurs services, depuis plus d'un siècle qu'elles sont inventées et perfectionnées, à produire directement elles-mêmes;

elles ont permis la fabrication plus parfaite de toutes les autres machines et d'une multitude d'outils, outils et machines sans lesquels cent industries seraient aujourd'hui ou annulées, ou réduites aux moyens primitifs les plus grossiers.

Voilà, pour l'industrie proprement dite, quelles seraient les conséquences de la suppression de la machine à vapeur. Mais quelle perturbation cette suppression ne produirait-elle pas dans nos relations commerciales ou autres, si l'on songe que la vapeur est aujourd'hui l'âme de la grande industrie des transports; si, brusquement, les 300 ou 400 000 kilomètres de voies ferrées existantes venaient à cesser leur service, et si les paquebots à vapeur ne faisaient plus, sur les fleuves, les canaux et les mers, leurs trajets périodiques accoutumés?

J'ai choisi là, à dessein, l'exemple de l'application scientifique qui a transformé de la façon la plus profonde et la plus universelle les conditions du travail et celles des relations internationales ou intérieures. Mais, en faisant sur chacune des principales inventions modernes une supposition pareille, si les conséquences ne se mesurent point sur une aussi grande échelle, ce n'est pas à dire pour cela qu'elles seraient pour chacun de nous moins sensibles. Nous avons aujourd'hui mille habitudes, mille besoins que nous ne trouverions plus que difficilement à satisfaire, si les inventions qui peu à peu les ont fait naître venaient à être anéanties. C'est ce que chacun pourra imaginer aisément en passant en revue autour de lui tout ce qui, de près ou de loin, se rattache à une invention, à un perfectionnement qui a la science pour origine. L'exposé sommaire des principales applications qui se trouvent décrites dans cet ouvrage, bien que restreintes à une seule science, la Physique, achèvera de mettre clairement en évidence la vérité de fait sur laquelle nous venons d'insister.

II

Suivons l'ordre naturel des matières, et commençons par les applications de la pesanteur. Ce sont, à quelques exceptions près, les plus anciennement connues et les plus universellement adoptées.

Si le poids des corps est le plus souvent, pour le travail, un obstacle qu'il faut vaincre, c'est aussi un utile auxiliaire dont les machines de toute espèce font un continuel et nécessaire usage : là nous sommes sur le terrain de la mécanique appliquée plutôt que sur celui de la physique. De ces applications, nous ne retenons que quelques-unes des plus frappantes, où c'est la force vive des corps qui tombent sous l'action de la pesanteur, plutôt que leur poids mort, qui sert à produire l'effet voulu. Dans d'autres cas, c'est le jeu d'actions relativement minimes qui, grâce aux propriétés des fluides, donne lieu à des effets qu'on peut dire prodigieux : la presse hydraulique, cette conception de Pascal qui ne put être réalisée qu'un siècle après lui, nous montre la force musculaire d'un seul ouvrier centuplée par la puissante machine, écrasant et broyant les matières les plus résistantes, soulevant à des hauteurs considérables des poids énormes. Mue par la vapeur, la presse hydraulique pose à 30 ou 40 mètres d'élévation le tube gigantesque de fer laminé qui fait franchir aux locomotives le bras de mer séparant l'île d'Anglesey du comté de Carnarvon, tube dont le poids n'est pas moindre de 2 millions de kilogrammes.

Quelle invention nouvelle a permis d'entreprendre et de mener à bonne fin cette œuvre grandiose du percement souter-

rain des Alpes, sous les masses du col de Fréjus, œuvre qui se répète aujourd'hui sous le Saint-Gothard? L'emploi de l'air comprimé par une chute d'eau dans des réservoirs, d'où il est chassé sous les profondeurs du tunnel en construction. Ainsi transformée, la force de la pesanteur met en mouvement les fleurets qui attaquent et broient la roche; puis, quand la poudre a terminé l'œuvre, l'air nouveau remplace l'atmosphère viciée et enfumée de la galerie commencée. Là où la vapeur eût échoué, la compression mécanique de l'air, obtenue par une chute d'eau, c'est-à-dire par la pesanteur, triomphe.

C'est aussi l'air comprimé qui rend possibles la construction et la fondation rapides des piles de ponts jetés sur les bras de mer ou sur les fleuves; qui, sur certaines lignes souterraines de chemin de fer, envoie les trains d'un bout à l'autre d'un tunnel, comme la balle lancée par une sarbacane; qui, à Paris, à Londres, à New-York, transmet les dépêches d'une station télégraphique à la station centrale. Le vide, fait à l'aide d'une puissante machine pneumatique sur l'une des faces d'un piston mobile dans un tube, laisse à l'air situé de l'autre côté une force expansive suffisante pour entraîner des fardeaux : ce procédé, inverse de l'application de l'air comprimé, est aussi adapté au service des dépêches télégraphiques ou postales; on l'a vu, en France, servir de moteur au train qui gravissait la pente du Pecq à Saint-Germain, près de Paris.

Un principe physique qui se rattache à la pesanteur, et dont la découverte remonte à une haute antiquité, — il porte le nom du grand homme qui l'a découvert, Archimède, — a été, à la fin du dernier siècle, appliqué à l'ascension des ballons dans les hauteurs de l'atmosphère. L'art de l'aéronaute, grandement perfectionné depuis Montgolfier, est devenu populaire : les aérostats sillonnent chaque année les régions aériennes, dont elles ont fait con-

naître de curieuses particularités et dont elles finiront, entre les mains d'observateurs sérieux, par dévoiler tous les mystères. La météorologie, encore si peu avancée, ne peut manquer d'y trouver son compte. Du reste on a vu, pendant la guerre, les ballons envoyés comme messagers, du sein de Paris, à toutes les parties de la France, portant aux absents, dans leurs frêles nacelles, des nouvelles de la population assiégée et toujours confiante. Peut-être un jour viendra-t-il, où le problème de la direction des navires aériens, sous leur forme actuelle ou plutôt sous une forme nouvelle, sera partiellement résolu; où ils pourront louvoyer sous le vent ou fendre l'air comme les navires à voiles ou à vapeur fendent les flots de la mer : alors, au lieu d'expériences curieuses ou exclusivement scientifiques, comme celles qu'on peut faire avec les ballons actuels, on pourra entreprendre de véritables voyages aériens, des expéditions régulières susceptibles d'applications utiles.

III

Des applications des phénomènes et des lois de la pesanteur, nous passerons à celles qui se déduisent des phénomènes et des lois des vibrations sonores.

Là nous nous trouverons presque exclusivement sur le terrain de l'art, de celui qui nous émeut et nous charme avec le plus de vivacité et en même temps de profondeur. La musique, d'ailleurs, n'est pas seulement un art, c'est aussi une science. Cependant ce n'est ni sous l'un ni sous l'autre de ces rapports qu'elle emprunte le secours de la physique appliquée. Mais

la voix humaine, ce merveilleux instrument naturel, mise à part, c'est à l'aide d'instruments artificiels que la musique exprime la pensée du compositeur, qu'elle sait donner un corps à ses mélodies, aux harmonies qui les enveloppent et les rendent à la fois plus expressives et plus pénétrantes. Depuis la lyre et la harpe antiques jusqu'au violon moderne, au chef-d'œuvre de sonorité et de douceur des Stradivarius, jusqu'à l'orgue si puissant, si savamment agencé, des facteurs contemporains, quelle innombrable variété d'instruments musicaux ont prêté tour à tour le secours de leurs sons aux musiciens de tous les temps et de tous les pays! C'est, il est vrai, par les longues et patientes recherches des fabricants, par les données de l'expérience, plutôt que par les indications de la théorie, que la plupart de ces instruments ont acquis peu à peu leur perfection actuelle. Il faut même ajouter que les conditions de cette perfection sont loin d'être toutes scientifiquement expliquées. Il n'est pas moins curieux de savoir comment les lois des vibrations sonores, qui régissent la série des sons de l'échelle musicale, se trouvent suivies et appliquées dans les instruments des divers types, quel est le mécanisme propre à chacun d'eux. Que d'exécutants jouent du violon, touchent du piano ou soufflent dans un instrument à vent, sans s'être rendu compte du rôle que remplissent les diverses parties de l'instrument qui leur est familier! Combien peu savent par quel mécanisme l'organiste arrive à produire ce merveilleux et puissant ensemble de voix qui affectent tous les tons et tous les timbres, en imitant, à s'y méprendre, tous les instruments d'un orchestre et jusqu'à la voix humaine!

Il y a là un intérêt de curiosité qui justifiera les chapitres où je passe en revue, en les considérant comme autant d'applications des phénomènes et des lois de l'acoustique, la plupart des

instruments connus. C'est un sujet nouveau, ou du moins traité dans un ouvrage consacré à la physique avec une étendue inaccoutumée. Je n'ai pu toutefois que l'effleurer. C'est un volume entier qu'il faudrait consacrer à cette matière, pour lui donner les développements qu'elle comporte et qu'elle mérite.

IV

Avec la lumière, avec les applications dont l'étude de ses phénomènes et de ses lois a permis d'enrichir la science, c'est dans deux mondes nouveaux que nous allons pénétrer. Nouveaux sans doute pour ceux d'entre nous, qui n'ont cultivé ni l'astronomie physique ni la physiologie, qui n'ont mis l'œil encore ni au télescope ni au microscope; mais, à coup sûr, mondes nouveaux pour tous ceux qui ont vécu deux siècles avant l'époque contemporaine. Que de merveilles inconnues, avant Galilée, dans les profondeurs du ciel, dans le monde de l'infiniment grand! Quelles étonnantes révélations dans le monde de l'infiniment petit, depuis Swammerdam! De nouvelles sciences ont surgi, qui n'étaient pas possibles sans le secours de ces puissants moyens d'investigation mis par l'optique au service des observateurs. Grâce au microscope, la structure des tissus végétaux et animaux est connue dans ses détails les plus intimes, les plus propres à dévoiler le mécanisme de la vie. Par le télescope, l'œil pénètre dans les espaces infinis et y découvre des millions d'astres dont l'œil pouvait à peine soupçonner l'existence, à des distances si prodigieusement éloignées, que c'est par siècles et par milliers de siècles qu'il faut compter, si l'on veut mesurer le temps que la lumière met à les franchir;

et cependant l'onde lumineuse se propage elle-même avec une vitesse foudroyante dans le sein de l'éther.

Rien de plus simple néanmoins que la composition de ces instruments d'optique, rien de plus aisé que d'en comprendre le principe et d'en expliquer les effets; rien enfin de plus facile, avec de la patience et du travail, que d'acquérir les notions pratiques propres à en rendre l'usage fructueux.

D'autres appareils, fondés sur des principes semblables, les héliostats, le sextant, les goniomètres, puis les spectroscopes, les appareils lumineux des phares, sont utilisés pour des recherches scientifiques de divers genres, et rendent des services de tous les instants à l'astronomie, à la minéralogie, à la marine; à tous ces titres, ils méritent d'être décrits et étudiés. Le sidérostat, cette invention posthume d'un de nos physiciens les plus ingénieux, Léon Foucault, bien qu'il n'ait pas encore fait ses preuves, doit être signalé pour les progrès qu'il ne peut manquer de provoquer dans les recherches d'astronomie physique, l'étude des taches du soleil, par exemple; sa place était marquée parmi les applications de l'optique, et il n'est pas oublié.

Mais une application intéressante entre toutes des propriétés de la lumière, une invention bien récente encore et parvenue à un rare degré de perfection, c'est celle qui nous permet de reproduire pour ainsi dire instantanément, et avec une fidélité merveilleuse, tous les objets qu'éclaire une source lumineuse d'une suffisante intensité. C'est un art populaire aujourd'hui que la photographie, populaire dans ses procédés et dans ses résultats, mais qui n'est pour cela ni moins intéressant dans son principe et dans ses moyens, ni moins fécond dans son influence sur les sciences et les arts. Par son principe, il a constitué pour ainsi dire une branche nouvelle de la science, la photochimie; quant aux services qu'il ne cesse de rendre aux autres arts et à

toutes les sciences naturelles, il est à peine besoin de les rappeler. Il est vrai de dire qu'on a un instant compromis la valeur de ce moyen de reproduction des objets naturels, en exagérant le rôle que pouvait jouer le photographe, et en laissant supposer qu'il pourrait supplanter l'artiste : comme si un procédé impersonnel était susceptible de traduire le sentiment intime du peintre, c'est-à-dire du poëte en présence de la nature, sentiment qui est la vraie source de l'inspiration, sans laquelle il n'y a pas de chef-d'œuvre. Le rôle de la photographie est à la fois plus modeste et plus utile : elle popularise les œuvres de la peinture, de la statuaire, de l'architecture et de la gravure; elle reproduit les moindres détails des vues naturelles, des objets qu'étudient le géographe, l'ethnographe, le naturaliste; elle permet aux plus pauvres familles de conserver les traits de personnes qui leur sont chères, et, en ce sens, elle a eu et aura toujours une influence moralisante.

Voilà pour les résultats. Mais si l'on se place au point de vue de la science, n'est-ce pas une chose vraiment merveilleuse que cette reproduction automatique des objets naturels, que cette peinture qui n'a d'autre agent que la lumière. Du reste, c'est un art qui nous fait marcher de surprise en surprise : après la photographie, voici venir l'héliogravure, qui, si l'on parvient à vaincre quelques difficultés pratiques, permettra bientôt de multiplier les images photogéniques, comme la typographie multiplie les épreuves des livres et des gravures ordinaires.

V

J'ai cité, au début de cette introduction, l'application la plus considérable des phénomènes et des lois de la chaleur, celle qui

est basée sur la transformation de la chaleur même en force mécanique. Aucune des applications de la physique ne peut rivaliser avec la machine à vapeur, au point de vue de l'immensité des résultats. Socialement parlant, c'est par sa puissance productive que se mesure la valeur de l'homme, individu ou nation. Or, la vapeur a accru dans une proportion énorme la somme de forces dont peut disposer l'homme pour la satisfaction de ses besoins; c'est donc comme si elle avait accru dans une proportion pareille sa capacité pour le travail.

Mais ce n'était pas tout de produire, et de produire beaucoup, il fallait mouvoir et distribuer les richesses produites, avec une rapidité et une régularité en rapport avec l'accroissement de production : la vapeur, sous la forme des chemins de fer et des steamers, a aussi résolu le problème. Enfin, il fallait multiplier encore la vitesse des relations que les communications postales par voies ferrées avaient déjà si grandement accrue : le commerce avait besoin de cet accroissement de vitesse; la politique le réclamait. La locomotive et la vapeur ayant à peu près dit, sous ce rapport, leur dernier mot, c'est un autre agent physique qui a fourni la solution de ce nouveau problème.

Je ne sais lequel est le plus étonnant, de l'invention de la télégraphie électrique, de la rapidité avec laquelle cette invention s'est réalisée et propagée sur le globe entier, ou de l'indifférence avec laquelle nous considérons aujourd'hui ce qui semblerait le plus étourdissant des miracles à un habitant des siècles passés.

Voici, en effet, sur un carré de papier grand comme la main, un certain nombre de lignes d'écriture que vous y avez tracées; vous apposez votre signature et remettez le tout à l'employé du poste télégraphique, qui place le papier sur la plaque de son appareil. Moins d'un quart d'heure après, la dépêche remise

a fait le trajet de Paris à Marseille. Cette étonnante rapidité n'est que la moitié de la merveille : votre écriture, avec sa physionomie autographique, votre signature, avec son paraphe, se trouvent reproduites, en *fac-simile* d'une exactitude irréprochable, sur un carré de papier de même dimension, posé de la même façon sur un appareil situé à 864 kilomètres de distance du premier. Joignez-y le temps nécessaire à la transmission du message au destinataire, et la réponse, autographe comme la dépêche même, va vous revenir de Marseille à Paris, avec une rapidité égale à celle de l'expédition. Le mouvement imprimé à un lourd pendule, à un style qui se meut au devant du papier et en parcourt successivement tous les points, c'est tout ce que vous avez pu saisir de l'opération miraculeuse qui s'est passée sous vos yeux, mais à laquelle, à moins d'être initié, vous n'avez certainement rien pu comprendre.

Cela ne paraît-il point, en effet, tout à fait incompréhensible? Cela est cependant, et vous savez, comme moi, quel est l'agent de ce miracle de la science, qui n'a rien de surnaturel : cet agent est l'électricité. C'est le courant né dans le sein d'une pile, et circulant avec la rapidité de l'éclair ou de la pensée dans le fil métallique tendu entre les deux postes, qui aimante en passant le fer doux inclus dans des bobines ou électro-aimants, et, après une série de mouvements qu'il n'est pas le moment de décrire, agit toutes les fois que le courant passe sur les styles traceurs des appareils. Une réaction chimique a donné lieu à la naissance du courant invisible ; une réaction chimique se produit à la fin, et une série de points colorés dessine sur le papier l'image même des caractères écrits au point de départ. Un dessin, un plan, une figure quelconque, des signes de sténographie, seraient reproduits de même.

Mille autres inventions curieuses — celle que je viens de

citer est sans doute au nombre des plus saisissantes — ont été réalisées sur le même principe : celui de l'action de l'électricité à grande distance. Cette force, dont la vraie nature est encore inconnue; dont, il y a trois siècles, on soupçonnait à peine l'existence; qui ne se manifestait auparavant que sous la forme terrifiante de la foudre; cette force est devenue, grâce à la science, grâce aux investigations de l'expérience, et aussi, disons-le bien haut, grâce aux indications de la théorie, l'agent le plus docile de l'homme. Elle transmet au loin la pensée humaine, le long des fils aériens des voies télégraphiques terrestres comme à travers les câbles qui sont plongés dans les profondeurs de l'Océan; elle enflamme à distance les mines et les torpilles; elle est la source d'une lumière qui rivalise avec celle du soleil; elle transmet et régularise le mouvement des horloges; elle fond les métaux; elle recouvre les objets usuels d'une imperceptible couche protectrice d'un métal précieux, de l'or, de l'argent, du platine; et enfin elle reproduit les œuvres du ciseleur ou du statuaire.

VI

Réunir en un seul ouvrage tant d'applications variées, décrire les instruments, les machines, les appareils de toute sorte par l'intermédiaire desquels les inventeurs sont parvenus à les réaliser; en faire comprendre, sinon tous les détails, du moins les principes, tel est le but que je me suis proposé en écrivant ce volume. Les divers chapitres qui le composent n'ont nullement la prétention de remplacer les manuels techniques, où chaque application est étudiée au point de vue des procédés : il eût fallu, pour cela, toute une encyclopédie. D'ailleurs la

pensée du livre est autre, je l'ai dit plus haut. Les APPLICATIONS DE LA PHYSIQUE sont le complément du volume où ont été étudiés les phénomènes et leurs lois. Les deux ouvrages ont même plan ; la division des matières y est la même, parce qu'il fallait, avant tout, que le lecteur pût rattacher, dans chaque sujet, le principe à ses conséquences, et qu'ainsi la pratique et la théorie vinssent à s'éclairer mutuellement.

Je dois ajouter en terminant, avec la pensée de mériter tout au moins l'indulgence du public pour la forme littéraire de cet ouvrage, que j'ai été plus soucieux d'instruire que d'amuser. Le sujet n'est pas de ceux qui prêtent à la fiction; mais je suis convaincu qu'on ne trouvera point pour cela qu'il manque d'intérêt. L'important était de le traiter avec toute la clarté possible, et ici, comme dans quelques ouvrages qui ont été accueillis avec bienveillance par le public, c'est surtout à être clair que je me suis attaché.

LES APPLICATIONS

DE

LA PHYSIQUE

AUX SCIENCES, A L'INDUSTRIE ET AUX ARTS

LIVRE PREMIER

APPLICATIONS

DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DE LA PESANTEUR

Il n'est pas de travail humain ayant la matière pour objet, où le poids des corps, que ceux-ci se présentent à l'état solide, à l'état liquide ou à l'état de vapeur ou de gaz, n'entre comme élément, et où, dès lors, il n'y ait lieu de tenir compte des effets de la pesanteur et de les calculer : cela est aussi indispensable pour le mouvement que pour l'équilibre. Ainsi notamment, les constructions fixes, telles que monuments, édifices publics ou privés, habitations, ponts, aqueducs, les constructions mobiles des voies de transport, terrestres, fluviales et maritimes, les machines, appareils, engins et outils de tout genre, pourraient être à bon droit considérés, à ce point de vue, celui de l'équilibre ou de la stabilité et du mouvement, comme autant d'applications de la physique, et spécialement comme des applications des phénomènes et des lois de la pesanteur.

Mais on comprendra aisément qu'un cadre aussi vaste n'est nullement celui que nous nous proposons de remplir. Le sens que nous voulons donner ici aux applications de la physique est beaucoup plus restreint : nous entendrons par là seulement celles dont le principe même est emprunté à cette science, aux forces qu'elle étudie, aux lois des phénomènes qui en sont la manifestation, laissant de côté les nombreuses applications qui dépendent exclusivement de la Mécanique. Cette remarque s'applique à toutes les catégories de la physique ; mais, pour ne parler ici que de la pesanteur, objet particulier du premier Livre, nous ne passerons en revue, nous ne décrirons que les applications, instruments ou machines, basés sur quelques-uns des phénomènes ou des lois de la pesanteur, par exemple sur la constance de la direction de cette force à la surface de la Terre, sur la force vive développée par un corps qui tombe d'une certaine hauteur, sur l'isochronisme des oscillations du pendule, sur la pression de l'atmosphère, etc. Et encore devrons-nous nous borner aux applications qui ont la plus grande importance pratique, dont l'utilité sociale est la plus positive, ou encore à celles qui offrent un intérêt de curiosité, et mettent le mieux en évidence les vérités scientifiques. Un certain nombre de ces applications sont connues depuis la plus haute antiquité ; d'autres sont d'invention moderne ; mais nous nous attacherons surtout à décrire leurs perfectionnements les plus récents.

Il ne faudra point oublier, du reste, que les applications scientifiques à l'industrie et aux arts et les inventions qui ont eu pour objet la science même se confondent souvent dans l'histoire : la découverte de telle loi physique a été la conséquence d'une recherche tout empirique, ayant d'abord pour unique objet le perfectionnement d'un métier, d'un procédé industriel ; inversement, telle invention d'une grande importance industrielle a été déduite peu à peu de la démonstration expérimentale ou mathématique d'une vérité de l'ordre le plus abstrait. C'est là un double fait sur lequel nous croyons devoir insister, parce qu'à nos yeux il a une réelle importance philosophique. Il nous paraît,

en effet, susceptible de mettre en garde nos lecteurs contre deux tendances opposées, également fâcheuses : l'une est le propre de gens entichés de leur savoir ou de leur habileté pratiques, et les conduit au dédain de la théorie et de la science pure ; l'autre, plus particulière à certains savants qui se croient profonds philosophes, les amène à faire fi des connaissances acquises dans la pratique des métiers et des industries par les praticiens, connaissances souvent très-réelles, bien que non raisonnées, et qu'il ne faut pas confondre avec la routine.

Ces observations préliminaires faites une fois pour toutes, nous entrons en matière.

CHAPITRE PREMIER

DIRECTION DE LA PESANTEUR — CHUTE DES CORPS OSCILLATIONS DU PENDULE

---

§ I — Fil a plomb et Niveaux

On a besoin, à chaque instant, dans les arts, et surtout dans ceux de la construction, d'établir des lignes ou des plans dans la direction de la verticale ou dans une direction horizontale, c'est-à-dire perpendiculaire à la première ; ou bien, on veut, si ces lignes et ces plans sont déjà construits, s'assurer de leur verticalité ou de leur horizontalité rigoureuse.

On le fait au moyen d'instruments qu'on nomme *fil à plomb*, *niveaux*, basés les uns et les autres sur ce fait : qu'un fil tendu par un corps pesant prend, quand il est en repos, la direction précise de la verticale du lieu où l'on se trouve.

Tout le monde connaît le fil à plomb dont se servent les maçons et qui consiste en une ficelle supportant un poids cylindrique de métal. Une plaque carrée, également métallique, ayant les dimensions du diamètre du cylindre, glisse, à l'aide d'un trou central, le long de la corde et s'applique contre le mur dont on veut reconnaître la verticalité. Le cylindre, une

fois en repos, doit raser la surface du mur, sans s'appuyer contre elle et sans laisser entre elle et lui d'intervalle sensible.

Une règle à bords ou arêtes latérales bien parallèles AB, CD, sur le milieu de laquelle est tracée une ligne droite OI, nommée *ligne de foi*, sert au même objet. On applique l'une des arêtes AB contre la ligne ou le plan à vérifier, et il faut que le fil fixé en O et tendu par une masse pesante coïncide, dans sa position d'équilibre, avec la *ligne de foi* de la règle. Pour que l'épreuve soit complète, il faut retourner la règle et faire la même vérification avec le côté CD.



Fig. 1.

Les niveaux de la figure 2 s'emploient pour vérifier l'horizontalité d'un plan ou d'une ligne. L'aspect seul des instruments en indique l'usage; et nous ne nous appesantirons pas plus longtemps sur cette application si simple

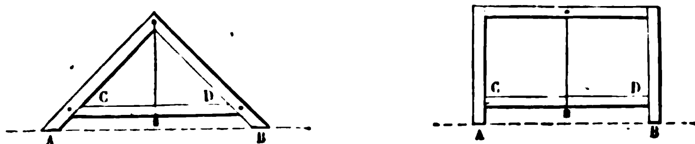


Fig. 2. — Niveaux de maçon ou à perpendicule.

de cette première loi de la pesanteur, par laquelle nous savons que sa direction est constante dans un même lieu.

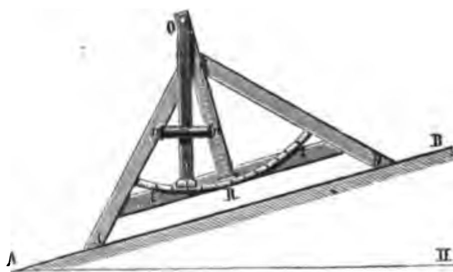


Fig. 3. — Niveau à perpendicule de Delambre, pour les opérations de géodésie.

En géodésie, on se sert du *niveau à perpendicule* (c'est le nom qu'on donne aux instruments représentés dans les figures 2 et 3),

convenablement perfectionné, pour mesurer l'angle d'inclinaison d'une droite. Le fil à plomb s'y trouve remplacé par une règle suspendue en O et dont l'extrémité inférieure est munie d'un vernier. Un limbe divisé permet de lire en degrés la valeur de l'angle POR formé par la règle et par la ligne de foi. On peut donc trouver l'inclinaison d'une ligne AB sur l'horizon AH. POR est égal, en effet, à l'angle BAH, puisque les deux côtés de ces deux angles sont perpendiculaires entre eux.

Delambre, dans les opérations qu'il a dirigées pour la mesure de la méridienne, a employé le niveau à perpendicule ainsi disposé, dans le but d'évaluer les inclinaisons à l'horizon des règles qui lui servirent à mesurer ses bases.

Plus loin, nous parlerons du *niveau d'eau* et du *niveau à bulle d'air*, fondés, l'un sur l'équilibre d'un liquide dans des vases communiquants, l'autre sur celui des fluides d'inégale densité.

§ II — Moutons et Sonnettes

Une masse pesante qui tombe d'une certaine hauteur se meut, comme on sait, avec une vitesse croissante, dont le carré est proportionnel à la hauteur du point de départ. Le travail ou effet mécanique, ainsi développé par l'action de la pesanteur, et qu'on mesure en multipliant la masse par le carré de la vitesse ou par la hauteur, est utilisé pour battre les pieux ou pilots qui servent de fondation aux piles des ponts et aux autres grands travaux hydrauliques. On donne le nom de *sonnettes* aux machines qui servent à élever, à guider et à laisser retomber sur la tête des pieux de grosses masses de bois ou de fonte qui prennent elles-mêmes le nom de *moutons*.

La *sonnette à tiraudes* et la *sonnette à déclic* sont représentées dans la Planche I. Elles diffèrent l'une de l'autre en ce que, dans la première, la manœuvre des moutons, soit pour

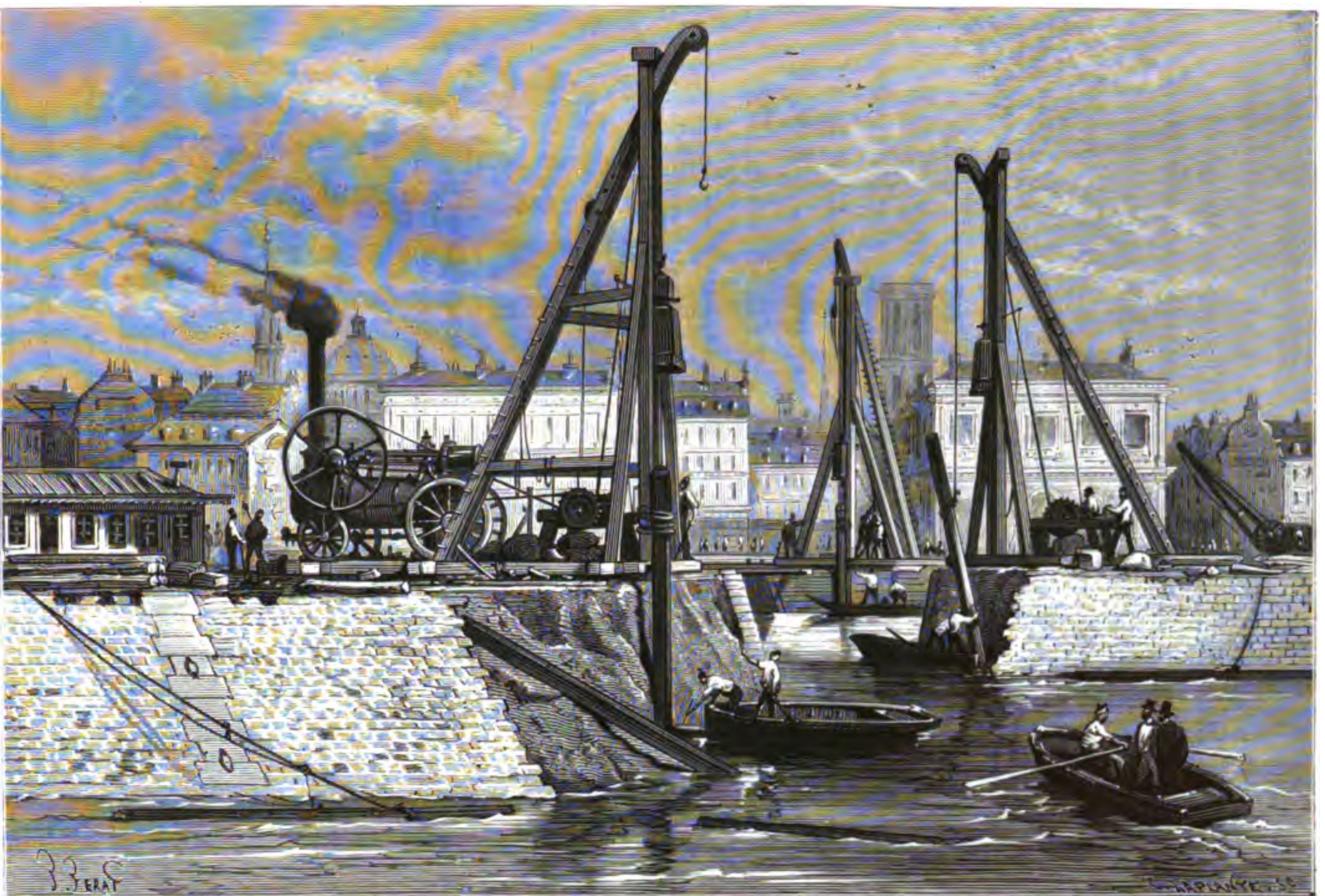


PLANCHE I — SONNETTES ET MOUTONS

Battage des pieux pour les fondations sur pilotis. — Sonnettes à tiraudes et à déclic ; sonnettes mues par la vapeur.

élever sa masse, soit pour la laisser retomber et glisser entre les deux pièces nommées *jumelles*, s'effectue à l'aide de cordes tirées individuellement par autant d'ouvriers.

Dans la seconde, un ou deux ouvriers suffisent, à l'aide d'un treuil à engrenages, pour élever le mouton à la hauteur voulue. Arrivée à ce point, la masse, qui pendant son élévation était retenue à l'aide d'un anneau par les deux mâchoires d'une pince, devient libre et retombe sur la tête du pieu.



Fig. 4. — Détails du mécanisme dans les sonnettes à déclic.

Le mécanisme particulier qui rend possible cette mise en liberté du mouton sera aisément compris si l'on jette les yeux sur la figure 4, qui donne le détail du *déclic*. Deux fortes pinces, engagées dans l'anneau qui termine le mouton à sa partie supérieure, sont maintenues par un ressort pendant l'ascension du poids; mais quand celui-ci arrive à l'extrémité de sa course, les branches supérieures des pinces s'engagent dans une ouverture rétrécie en forme de cône ; elles se resserrent progressivement, et, par un mouvement contraire, les deux mâchoires inférieures s'ouvrent, se dégagent de l'anneau et laissent précipiter le mouton.

Le plus souvent on commence le travail avec les *sonnettes à tiraudes*, qui ont l'avantage de la simplicité et de la rapidité de la manœuvre, mais qui ne permettent d'élever le mouton qu'à une faible hauteur, d'environ 1 mètre ou $1^{m},20$. Quand les pieux, déjà enfoncés à une certaine profondeur, ne cèdent plus que difficilement sous les coups du mouton, on emploie les *sonnettes à déclic* pour achever le travail. Avec celles-ci, la masse peut être élevée à une hauteur qui varie entre $2^{m},5$ et 5 ou 6 mètres. L'effet utile, qui dépend de la hauteur de la chute, est donc beaucoup plus considérable.

Le poids du mouton varie de 300 à 600 kilogrammes, et le

nombre des hommes nécessaires à la manœuvre, dans les sonnettes à tiraudes, s'élève jusqu'à 40. Récemment, on a appliqué la vapeur à ces appareils; comme le montre la Planche I, c'est une locomobile qui donne en ce cas le mouvement au treuil de la sonnette à déclic.

Le *marteau-pilon*, qui est une sorte de mouton employé aux travaux des forges, est une application de la pesanteur analogue aux sonnettes. Nous n'en parlons ici que pour mémoire, nous réservant d'y revenir dans les chapitres consacrés à la vapeur. Ici, en effet, nous ne devons avoir en vue qu'une application importante de la force vive développée par une masse pesante dans sa chute, sous la seule action de la pesanteur.

Remarquons, pour terminer, que toute cette force n'est point utilisée, dans le choc, à produire l'effet voulu, qui est l'enfoncement des pilots : une partie se transforme en chaleur, c'est-à-dire en un mouvement moléculaire intime des deux masses qui se choquent, le mouton d'une part, de l'autre la tête du pieu, et le cercle ou frette de fer dont cette tête est armée pour résister à l'effort latéral qui, sans elle, ferait éclater la pièce de bois en morceaux.

§ III — Le Pendule régulateur des horloges

Galilée, après avoir découvert la propriété des oscillations du pendule d'être sensiblement isochrones, quand leur amplitude est très-petite, songea à utiliser cette propriété précieuse pour la mesure exacte du nombre des pulsations artérielles. L'instrument qu'on nomma *pulsilogue*, et qui est simplement un pendule a été, dit-on, inventé par lui.

Mais il paraît certain qu'Huygens est le premier inventeur de l'application de l'isochronisme du pendule à l'horlogerie (1656). Il y avait à peu près trois siècles et demi que l'usage des hor-

loges à roues dentées s'était répandu ; mais c'étaient encore des machines bien imparfaites, faute d'un régulateur constant du mouvement de leurs organes. Voici comment ce savant illustre résolut le problème.

On sait que, dans les instruments d'horlogerie, le moteur est tantôt un poids qui, en descendant sous l'influence de la pesanteur, déroule la corde par laquelle il est suspendu, et fait ainsi tourner l'axe d'une roue dentée d'une manière continue ; tantôt c'est un ressort d'acier qui se détend peu à peu et dont un mécanisme spécial rend l'action à peu près uniforme ; en se détendant, ce ressort fait également mouvoir d'une manière continue la roue dentée, qui transmet son mouvement à tous les autres rouages de l'instrument.

Dans un cas comme dans l'autre, la difficulté était d'établir un mouvement parfaitement régulier et uniforme, malgré toutes les causes d'altérations et les résistances variables offertes par le jeu d'un nombre de pièces assez grand.

On y est parvenu de diverses manières, en transformant le mouvement continu imprimé aux rouages par le moteur, en un mouvement oscillatoire ou périodique, à l'aide du régulateur. Le plus simple, et en même temps le plus précis des régulateurs des horloges, est le pendule. Voici comment Huygens en a conçu et réalisé l'application.

R est une roue dentée, à dents obliques, à laquelle le poids moteur de l'horloge communique le mouvement, qu'elle transmet ensuite au système de pignons et de roues dentées constituant le mécanisme particulier de l'instrument. Dans la figure, nous avons supprimé, pour plus de simplicité, les rouages intermédiaires.

PP′ est le pendule ou régulateur du mouvement. Ses oscillations se transmettent par l'intermédiaire de la fourchette ou pièce mobile *f* et de l'arbre ED à la pièce ABC, à laquelle sa forme a fait donner le nom d'*ancre*. ABC oscille donc de la même manière que le pendule lui-même. Et comme ses deux extrémités A, C, se recourbent de façon à venir s'engager entre les dents

de la roue R, pendant que l'une des dents s'appuie sur la face supérieure d'une des extrémités de l'ancre, le mouvement de la roue est suspendu. A chaque oscillation de l'ancre, une dent de la roue ainsi arrêtée se dégage et le mouvement continue, de sorte que ce mouvement, qui serait continu s'il était dû à la seule action du poids moteur, est devenu périodique, la durée de chaque période étant celle d'une des oscillations du pendule.

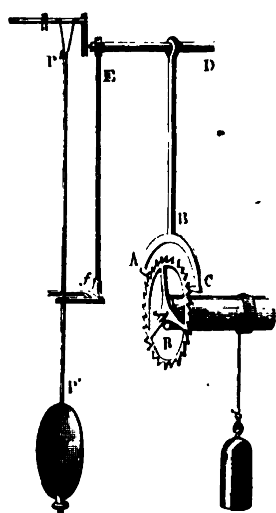


Fig. 5. — Mécanisme du pendule régulateur.

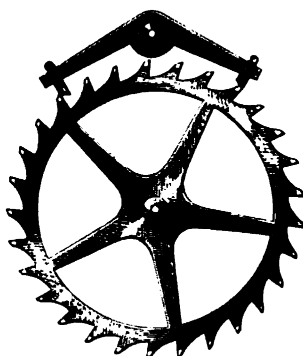


Fig. 6. — Échappement à ancre.

Comme celles-ci sont isochrones, il en est de même du mouvement de la roue dentée et de celui de tous les autres rouages. Mais la disposition des pièces A et C est telle (fig. 6), qu'à chaque période la dent de la roue, qui presse sur l'une d'elles pour s'échapper, communique de son mouvement à l'ancre, puis au pendule, dont les amplitudes restent ainsi constantes, et dont les oscillations ne s'arrêteraient que si le moteur, poids ou ressort, venait à cesser d'agir.

Quant à la durée des oscillations du pendule, elle dépend, comme on sait, de sa longueur, et cette longueur se détermine, dans chaque horloge, d'après la liaison qui existe entre l'aiguille des minutes et la *roue de rencontre*, nommée aussi *roue à rochet* ou *roue d'échappement*.

On voit, par ce qui précède, que la fonction du pendule est de régulariser le mouvement du moteur des horloges, en partageant ce mouvement continu en une série de mouvements oscillatoires, dont la période a une durée constante. Mais comme il reçoit ses impulsions de ce moteur, dont l'action efficace peut varier pour diverses causes, il en résulte que les amplitudes de ces oscillations sont susceptibles de diminuer : leur durée peut donc se raccourcir, alors même que la longueur du pendule ne serait pas altérée, d'où résulterait une avance de l'horloge. Huygens chercha et trouva le moyen de résoudre cette difficulté par une admirable découverte qui, malheureusement, n'a pu être adoptée à cause des difficultés qu'elle présente dans l'application. Nous voulons parler de l'invention du pendule cycloïdal, ainsi nommé parce qu'il est fondé sur une propriété de la courbe géométrique nommée *cycloïde*.

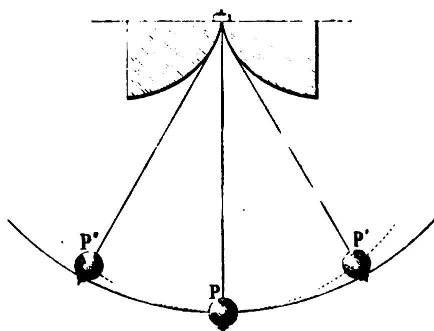


FIG. 7. — Pendule cycloïdal d'Huygens.

C'est un pendule dont la tige est une lame métallique flexible, suspendue entre deux pièces solides affectant la forme de deux arcs de cycloïde tangents au point d'origine. En oscillant, la tige s'enroule sur chacun de ces arcs, et la longueur du pendule diminue ainsi dans une proportion qui dépend de l'amplitude des oscillations. Huygens trouva que si le cercle générateur des arcs de cycloïde a précisément pour longueur la moitié de la longueur d'oscillation du pendule, le centre de celui-ci décrit un arc P″PP′ qui est lui-même un arc de cycloïde. Or, un corps pesant qui descend sur un arc de cette nature met le même temps pour arriver au bout de sa course en P, quelle que soit la hauteur du point de départ. En un mot, les oscillations du pendule sont toujours isochrones, et cet isochronisme est indépendant de l'amplitude.

Une autre difficulté vient de ce que la longueur du pendule varie avec la température, augmentant quand la température augmente, se raccourcissant quand elle diminue. Nous verrons plus tard, dans le Livre consacré aux applications de la Chaleur, comment on parvient à surmonter cette difficulté d'un autre genre. Nous terminerons ce paragraphe en faisant ressortir l'extrême importance de la découverte et de l'invention d'Huygens, invention qui a été elle-même une conséquence des observations de Galilée. L'horlogerie est devenue, à partir de cette époque, c'est-à-dire depuis un peu plus de deux siècles, un art de précision qui a rendu à toutes les sciences physiques, mais surtout à l'astronomie, les services les plus précieux.

§ IV — Le mouvement de rotation de la terre et la déviation apparente du pendule

Nous avons mentionné dans notre ouvrage : *les Phénomènes de la physique*, quelques-unes des applications des propriétés et des lois du pendule à la physique du globe. Il nous reste à dire quelques mots d'une expérience qui a eu, il y a une quinzaine d'années, un assez grand retentissement dans le public, bien qu'elle n'ait guère été comprise que des hommes de science. Nous voulons parler de la démonstration expérimentale du mouvement de rotation de la Terre par la déviation d'un pendule, démonstration imaginée et réalisée par Léon Foucault.

L'expérience dont nous parlons est basée sur un principe de mécanique qui, appliqué au mouvement de rotation d'un sphéroïde comme la Terre, se résume en ces trois propositions :

1° Un pendule placé à l'un des pôles de la Terre, et dont le point de suspension serait sur le prolongement de l'axe de rotation terrestre, oscillerait de façon qu'en réalité le plan de ses

oscillations successives conserverait dans l'espace une direction invariable. Dès lors un observateur posté en ce lieu, se trouvant entraîné par la rotation de la Terre, sans avoir conscience de son propre mouvement, croirait voir le pendule osciller dans des plans variables coïncidant successivement avec tous les méridiens; après un jour sidéral, c'est-à-dire après vingt-trois heures cinquante-six minutes de temps moyen, le plan d'oscillation du pendule lui semblerait avoir effectué une révolution complète autour de la verticale, et dans un sens précisément opposé à celui de la rotation réelle.

2° A l'équateur, au contraire, le mouvement de rotation du globe n'aurait aucune influence sur la direction apparente du plan des oscillations, qui semblerait et serait en effet immobile relativement à l'horizon.

3° Enfin, la théorie démontre qu'à une latitude différente de 90° ou de 0°, la déviation apparente du plan des oscillations du pendule se ferait dans le même sens qu'au pôle le plus voisin. Seulement, cette déviation serait d'autant plus lente que le lieu de l'expérience serait plus voisin de l'équateur. Le calcul montre qu'à Paris (latitude de 48° 50′), le pendule mettrait environ 32 heures pour faire le tour entier de l'horizon, si l'on fait abstraction, bien entendu, des retards occasionnés par le frottement au point de suspension et par la résistance de l'air.

Or, la vérification de ce résultat a été faite à Paris, sous le dôme du Panthéon, par Léon Foucault, en 1851. Ce savant physicien avait disposé son expérience, qui attira un grand nombre de curieux, de la façon suivante. Au point culminant de l'intérieur de la coupole, se trouvait, solidement encastré dans une plaque métallique, un fil d'acier de 64 mètres de longueur, qui portait à son extrémité inférieure une sphère de laiton très-pesante. Écarté de sa position verticale et abandonné à lui-même, ce pendule exécutait, avec une grande lenteur, une série d'oscillations dans un plan dont la théorie, nous l'avons dit plus haut, démontre l'invariabilité. Dans l'hypothèse de l'immobilité

de la Terre, l'orientation primitive de ce plan aurait donc dû rester constante. Or, les nombreux spectateurs de cette expérience curieuse purent constater la déviation apparente d'orient en occident du plan vertical dans lequel oscillait le pendule. En

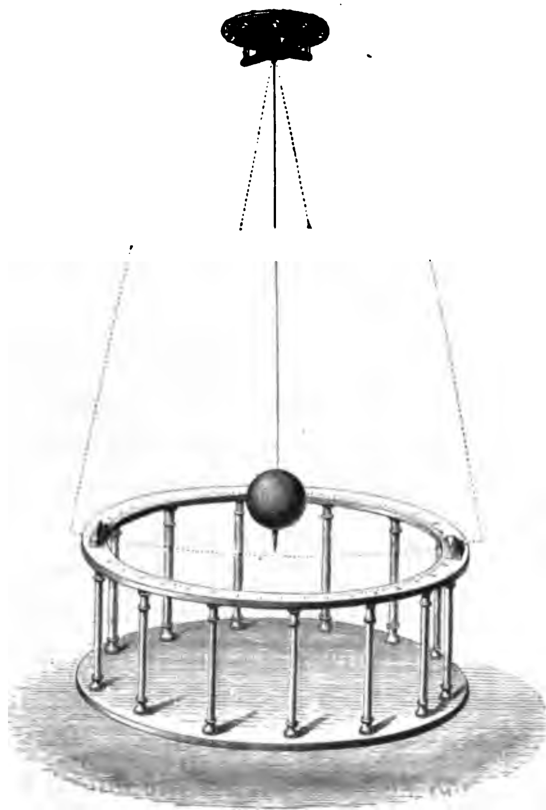


Fig. 8. — Pendule de Léon Foucault ; expérience faite au Panthéon en 1851.

une heure, l'arc mesurant cette déviation était, à fort peu de chose près, celui qu'indiquait la théorie, c'est-à-dire 11° 17′ 39″. Deux monticules de sable, disposés sur une balustrade circulaire et aux extrémités d'un même diamètre, étaient peu à peu entamés en sens inverse par une pointe métallique fixée au-dessous de la boule du pendule, de sorte que la déviation apparente du plan des oscillations, due au mouvement de rotation de notre

globe, et par suite cette rotation même, étaient rendues sensibles aux yeux de tous [1].

§ V — Balances usitées dans le commerce ou dans l'industrie

Nous avons décrit la *balance de précision* dans le premier Livre des *Phénomènes de la physique :* c'est la seule qu'on emploie pour les déterminations scientifiques de pesées nécessitant une grande exactitude. D'autres types de balances, plus grossièrement construits, en vue d'une moindre approximation, sont en usage dans les transactions commerciales et industrielles ; nous allons rapidement décrire les plus usités, sans insister sur les détails de leur construction, qui sont plutôt du domaine de la mécanique que de celui de la physique.

La *romaine* est un de ces types les plus anciennement connus : son nom lui vient des anciens Romains, chez lesquels elle était usitée. Sa construction, fort simple, repose sur ce principe de mécanique que les poids de deux corps pesants agissant aux extrémités de deux bras de levier inégaux sont, quand l'équilibre est établi, en raison inverse des longueurs des bras de levier.

Dans la romaine, le fléau AB (fig. 9) se compose de deux parties, dont la plus courte OA forme un bras de levier de longueur constante, à l'extrémité duquel est suspendu un crochet ou un plateau destiné à recevoir les corps à peser. Sur la plus longue partie OB, convenablement divisée en kilogrammes et fractions de kilogramme, se meut un anneau M qui soutient un poids P, toujours le même : c'est ce poids qui, avancé ou reculé le long de la tige divisée, fait équilibre aux corps pesants placés dans le bassin Q ou suspendus au crochet. On reconnaît que cet

1. Léon Foucault a mis en relief d'une autre façon, en s'appuyant sur un principe de mécanique analogue, la rotation de la Terre. L'appareil auquel nous faisons allusion a reçu de lui le nom de *gyroscope*. Le lecteur en trouvera la description dans les traités de mécanique les plus récents.

équilibre a lieu quand le fléau conserve, après quelques oscillations, une direction horizontale.

La romaine est ordinairement construite de façon que le centre de gravité O de tout l'appareil se trouve sur la verticale qui passe par l'arête du couteau de suspension et un peu au-dessus. Alors, en l'absence du poids curseur et de tout poids placé dans le plateau, le fléau reste en équilibre en prenant une position horizontale. Le zéro de la graduation est donc au point de suspension lui-même. Les différentes divisions ont été obtenues en plaçant un poids connu, de 1 kilogramme, par exemple,

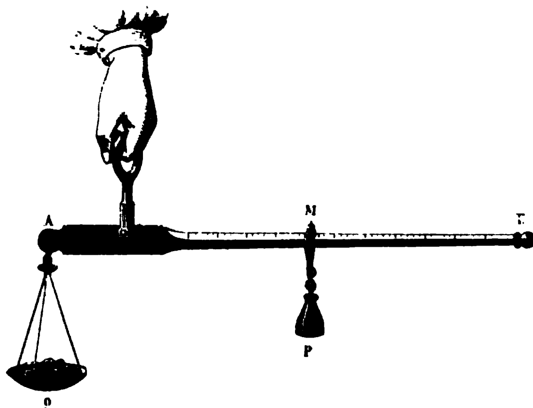


FIG. 9. — Balance romaine.

dans le plateau et en cherchant le point du fléau où le poids curseur produit l'équilibre : en ce point, on marque 1 kilogramme. La longueur comprise entre 0 et 1, partagée en divisions décimales et portée sur le grand bras du fléau, donne la graduation de la romaine. C'est une balance assez commode, puisqu'elle n'exige pas l'emploi de poids marqués, et propre à la mesure des poids considérables, quand on ne tient pas à une évaluation rigoureuse. Elle est peu sensible ; aussi l'usage n'en est-il légalement autorisé que si elle trébuche pour un excès de poids égal à la 500e partie de sa charge maximum.

La *balance à bascule* ou *de Quintenz* (c'est le nom de l'inven-

teur) est basée sur le même principe que la romaine, le corps à peser et les poids agissant à l'extrémité de bras de levier inégaux. Mais il y a cette différence : que ces deux bras sont de longueurs invariables, et que c'est à l'extrémité du bras le plus court qu'agit le corps à peser. La balance à bascule exige donc, comme les balances ordinaires, une série de poids; mais ces poids sont moindres que ceux des objets : par exemple, si le rapport des leviers OB et OA est celui de 1 à 10, on fera équilibre aux corps pesants avec des poids marqués dix fois moins lourds.

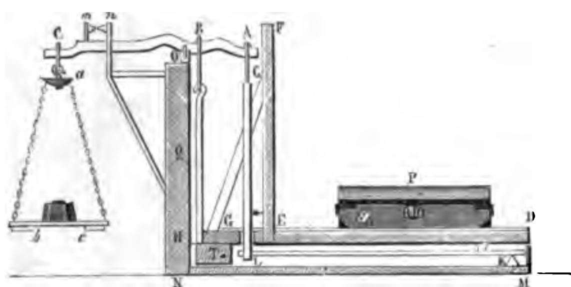


Fig. 10. — Balance à bascule ou de Quintenz.

La plate-forme DE, sur laquelle on place le corps à peser, repose par une arête horizontale I sur une pièce KL formant levier mobile autour de K et agissant par le coude LA sur le bras OA du fléau. Les distances IK et KL étant établies proportionnelles à OB et OA, il résulte de cette disposition que la plate-forme DE, horizontale avant qu'on y place le corps à peser, restera horizontale quand ce corps, par son poids, la fera fléchir, ou, ce qui revient au même, le mouvement du point A sera au mouvement du point B dans le rapport même des bras de levier OA et OB. D'où enfin cette conséquence, que l'action du poids du corps, qui est répartie en B et en A, est la même que si elle était tout entière exercée en B; de sorte que dans notre hypothèse il suffira de poids dix fois moins lourds que celui du corps à peser pour équilibrer celui-ci. Si l'équilibre, par

exemple, est établi, en poids marqués, avec $5^k,400$, le poids réel du corps est 54 kilogrammes.

Les balances à bascule, auxquelles diverses modifications ont été apportées depuis leur invention, sont très-usitées dans les bureaux à bagages des messageries, des chemins de fer et dans les magasins du commerce. Quand il s'agissait de peser des voitures ou des wagons tout chargés, on se servait autrefois, en France, des *ponts à bascule*, sortes de balances dont le principe

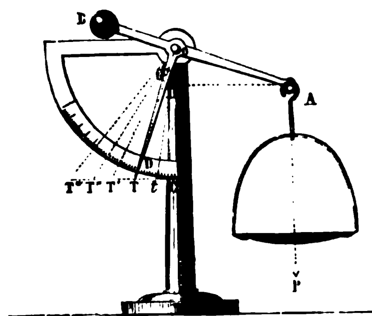


Fig. 11. — Peson.



Fig. 12. — Pèse-lettres.

est analogue à celui des balances de Quintenz, c'est-à-dire repose sur une combinaison de leviers de diverses longueurs. On emploie encore, dans quelques pays étrangers, les ponts à bascule ou *balances de Sanctorius* (du nom du savant italien auquel on en attribue l'invention).

Le *peson* est une balance qu'on emploie pour la pesée des matières légères, des lettres par exemple (on le nomme dans ce cas *pèse-lettres*), ou, dans les filatures, de la soie, de la laine, du coton.

C'est un levier AB susceptible de tourner autour du point O. L'une des branches A porte le plateau ou bassin destiné à recevoir les matières à peser. En O est une aiguille fixée au levier à angle droit : le peson étant libre, AB reste horizontal, et l'ai-

guille prend alors une position verticale ; mais quand on place un corps dans le plateau, l'action de ce poids au bout du bras de levier OA entraîne l'aiguille et lui fait parcourir les divisions d'un arc de cercle convenablement gradué. Cet appareil n'exige, comme on voit, l'usage d'aucun poids. Sa graduation se déduit d'un principe de mécanique très-simple, à savoir, que les poids placés dans le plateau sont proportionnels, non pas aux angles que l'aiguille fait avec la verticale, mais aux tangentes de ces

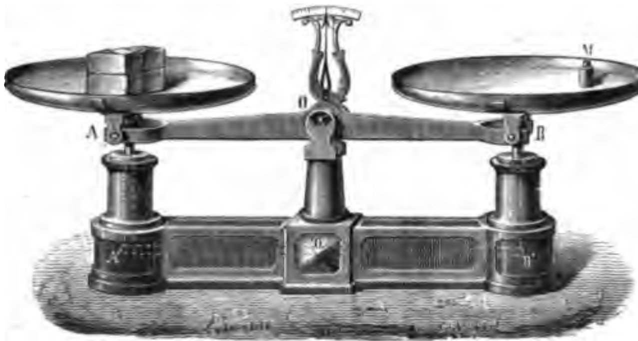


Fig. 13. — Balance de Roberval.

angles, c'est-à-dire aux distances CT, CT'..., que la direction de l'aiguille prolongée détermine sur la ligne horizontale menée du point C et tangente à l'arc de cercle décrit du point O comme centre.

La figure 12 représente la forme qu'on donne habituellement au peson quand on l'emploie à la pesée des lettres.

Nous terminerons cette description des instruments de pesage usités dans le commerce et l'industrie, par quelques mots sur la *balance de Roberval.* Les deux plateaux de cette balance reposent, à la partie supérieure du fléau, sur deux couteaux dont les tranchants sont tournés vers le haut et sont fixés à deux tiges mobiles, égales, reliées entre elles à leurs extrémités inférieures par un levier également mobile autour de son milieu. Cette disposition, qui ne change en rien les conditions de l'équilibre,

ainsi qu'on le démontre en mécanique, rend très-commode l'emploi de cette balance. Les corps à peser et les poids marqués se placent en effet et s'enlèvent sans qu'on soit gêné, comme dans la balance ordinaire, par les cordons ou fils de suspension des bassins. Aussi l'usage de la balance de Roberval est-il aujourd'hui très-répandu.

CHAPITRE II

LA PRESSE HYDRAULIQUE — LES ARÉOMÈTRES LES PUITS ARTÉSIENS

---

§ I — Presse hydraulique — Principe et construction

Pascal avait démontré que toute pression exercée en un point de la masse d'un liquide, se transmet avec une égale énergie dans tous les sens; il avait tiré de là cette conséquence qu'on peut, avec un effort relativement faible, exercer une pression considérable, pourvu que l'on prenne un liquide, de l'eau, par exemple, pour intermédiaire de cette transmission, et pourvu que le piston sur lequel agit l'effort appuie sur le fluide par une surface proportionnellement beaucoup plus petite que celle du piston récepteur; en un mot, il avait prouvé que la pression se transmet en s'augmentant dans le rapport des surfaces des deux pistons. Théoriquement, la *presse hydraulique* était inventée; mais les difficultés d'exécution n'en permirent point l'application pratique. Pendant longtemps on ne sut par quel artifice empêcher les fuites d'eau par les joints des pistons; ces fuites étaient dues à la force même avec laquelle le liquide, très-peu compressible, comme on sait, était pressé à l'inté-

rieur de l'appareil; il s'échappait par les plus légères fissures.

Le moyen de remédier à cet inconvénient, moyen très-simple et à la fois très-efficace, a été trouvé en 1796 par un ingénieur anglais, Bramah.

La figure 14 représente un modèle de presse hydraulique, telle qu'on l'emploie aujourd'hui dans l'industrie pour compri-

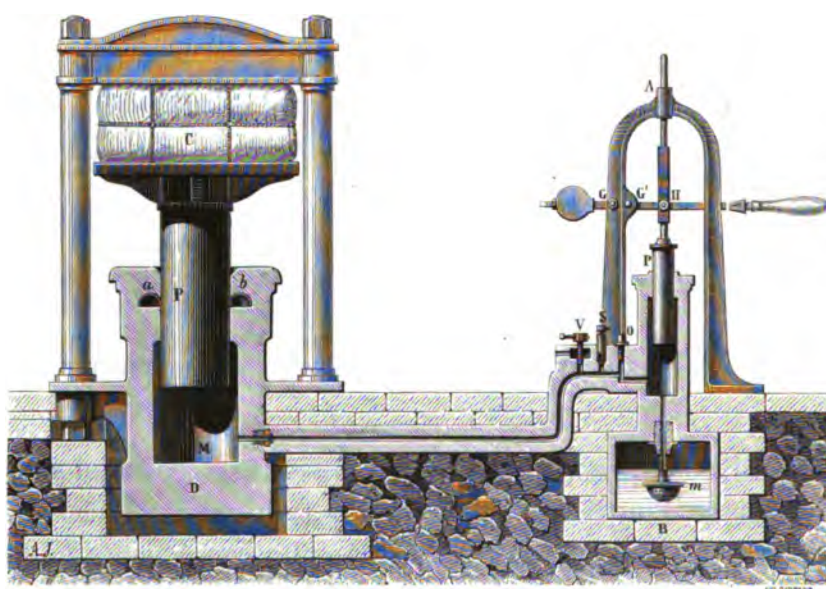


FIG. 14. — Presse hydraulique : vue et coupe.

mer certaines matières. Ces matières C sont placées entre deux plateaux, l'un fixé à la partie supérieure d'un bâti solide; l'autre, mobile entre les montants du même bâti, est poussé de bas en haut par la tête du plus grand piston P. Ce dernier plonge dans un corps de pompe cylindrique M plein d'eau, qui communique par un tuyau avec une pompe foulante. C'est le piston *p* de cette pompe qui reçoit la pression à transmettre, et qui joue le rôle du plus petit piston de la machine théorique.

Voyons maintenant, à l'aide de la même figure, qui représente une vue intérieure des principaux organes de la ma-

chine, comment ces divers organes sont disposés et fonctionnent.

AB est la pompe foulante manœuvrée par un levier et dont le piston *p* foule l'eau du réservoir *m* dans le cylindre M. La pression exercée par le liquide se transmet au piston P, et, par suite, aux matières placées au-dessus du plateau C.

Pour prévenir les fuites d'eau par les fissures des joints du piston P et du cylindre, Bramah a imaginé de réserver dans le massif des parois du cylindre un espace annulaire *ab*, et de remplir cet espace à l'aide d'une pièce de cuir découpée d'abord en forme d'anneau plat, puis emboutie, c'est-à-dire façonnée en U renversé sur tout son contour, comme le montre la figure 14. L'eau qui pénètre au-dessous de cet anneau dans l'espace annulaire réservé exerce sa pression sur toute la face inférieure du cuir; il en résulte que plus la pression est considérable, plus l'anneau s'applique avec force à la fois contre le cylindre et contre le piston, plus le joint qui les sépare est hermétiquement fermé.

Le plus souvent, la pression à exercer, faible au début de l'opération quand les substances à comprimer sont encore peu compactes, doit aller en croissant à mesure que l'on approche du but qu'on se propose. On obtient ce résultat sans avoir besoin de modifier la force employée : on raccourcit simplement le bras de levier de la pompe. La pression dépend en effet du rapport des surfaces des pistons et de la longueur du bras de levier servant à la manœuvre. Ainsi la surface du piston P est-elle 50 fois celle du piston *p*, et la distance du point H, où s'exerce la force de la manœuvre, au point G autour duquel tourne le levier, est-elle 10 fois plus grande que GH, la pression totale transmise vaut 50×10 ou 500 fois celle de la manœuvre. Si cette dernière équivaut à un poids de 100 kilogrammes, la pression effectuée, abstraction faite des pertes dues au frottement, sera 500×100 ou 50 000 kilogrammes.

Il résulte de là que, pour diminuer cette pression, il suffit

d'allonger la distance GH, ce qui se fait très-aisément en changeant de position l'axe GG', autour duquel tourne le levier; en raccourcissant la même distance, on accroîtrait la pression.

Du reste, chaque machine est construite dans des conditions de solidité et de résistance combinées en vue des opérations qu'elle a pour objet d'effectuer.

Les usages de la presse hydraulique sont aujourd'hui très-variés : on l'emploie pour exprimer les sucs de certaines plantes, par exemple l'huile des graines oléagineuses; pour comprimer le papier, les étoffes, les fourrages destinés à être transportés à de grandes distances, et qui occupent, ainsi comprimés, un volume beaucoup moindre qu'avant l'opération; elle est utilisée dans la fabrication des bougies, du vermicelle, etc. Les câbles de fer qu'on forge dans les usines nationales pour la marine, sont soumis à des épreuves ayant pour objet de vérifier la résistance à la traction : c'est la presse hydraulique qui sert à cette vérification.

La même machine a servi à élever des poids considérables à de grandes hauteurs. C'est ainsi qu'ont été montés, au haut des piles de Britannia Bridge, les quatre énormes tubes de fer laminé composant le tablier de ce pont gigantesque, qui permet au chemin de fer de Chester à Holyhead de franchir le bras de mer situé entre l'île d'Anglesey et le comté de Carnarvon. Près de 2 millions de kilogrammes ont été ainsi élevés à une hauteur moyenne de 33 mètres par des presses hydrauliques mues par la vapeur.

Nous devons signaler une modification récente et très-ingénieuse de la presse hydraulique primitive, consistant dans la suppression de la pompe foulante qui transmet au piston du gros corps de presse l'action motrice, et dans la substitution au piston de cette pompe d'un fil métallique ou d'une corde. Le fil ou la corde dont il s'agit est introduit, par voie de traction, dans le corps de presse; il transmet au liquide incompressible que

renferme ce dernier la pression nécessaire à cette introduction, et cette pression même se trouve multipliée, comme dans la presse hydraulique ordinaire, dans le rapport des surfaces de section du gros piston et du fil.

Le corps de presse renferme (fig. 15) une bobine qui est manœuvrée du dehors, à l'aide d'une manivelle, et qui reçoit successivement autour d'elle le fil que lui abandonne une autre bobine. Peu à peu le fil se trouve donc introduit dans le liquide

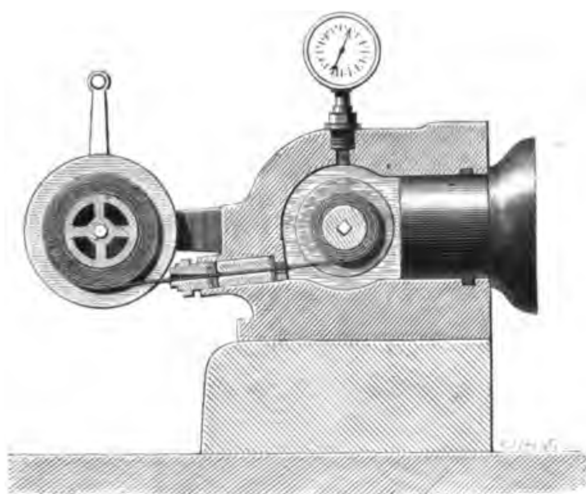


Fig. 15. — Presse sterhydraulique de MM. Desgoffe et Ollivier.

(c'est ordinairement de l'huile) que contient le corps de presse. Ce liquide se trouve ainsi déplacé, et la pression qu'il doit subir, pour que ce déplacement s'effectue, se transmet également sur chaque élément de la surface de section du piston égal à la section du fil lui-même.

Il y a, à cette disposition nouvelle imaginée par MM. Desgoffe et Ollivier, deux principaux avantages. D'abord la force comprimante se trouve considérablement accrue, puisqu'on peut donner au fil un diamètre beaucoup plus petit que celui du piston de la pompe foulante, à cause des déformations qu'une tige de métal rigide subirait inévitablement si ses dimensions étaient trop faibles. De plus, l'introduction du fil de la presse *sterhy-*

draulique se fait par enroulement autour de bobines intérieures et extérieures au cylindre du corps de presse ; le mouvement est donc continu, tandis que la compression se fait par coups successifs dans la presse ordinaire. Mais, à côté de ces avantages, il y a des inconvénients, que M. Tresca résume ainsi dans le rapport, d'ailleurs favorable, que ce savant ingénieur a fait de la presse sterhydraulique à la *Société d'encouragement pour l'industrie nationale :*

« Pour loger la bobine intérieure, il faut donner au corps de presse une capacité plus grande ; pour pouvoir transmettre le mouvement, il faut ménager un orifice destiné au passage de l'arbre et munir cet orifice d'une boîte à étoupe bien étanche ; il en est de même pour l'orifice d'introduction du fil, qui ne doit laisser suinter aucune partie du liquide, sous peine de laisser vider la presse et d'occasionner, pendant le fonctionnement, d'assez grandes diminutions de pression. »

D'après M. Tresca, l'emploi de cette nouvelle presse serait surtout avantageux dans la petite mécanique. Dans les grandes applications, elle rencontrerait, selon lui, des difficultés sérieuses.

§ II — Les Aréomètres — Pèse-sels et Pèse-liqueurs

Tout le monde connaît l'histoire d'Archimède courant, au sortir du bain, par les rues de Syracuse, en criant comme un fou : Εὕρηκα, εὕρηκα. « J'ai trouvé ! j'ai trouvé ! » Il s'agissait d'un problème dont le roi Hiéron l'avait prié de chercher la solution, à savoir si dans une couronne livrée à ce prince par un orfévre comme étant tout entière d'or pur, il entrait ou non d'autres matières. La découverte du principe d'hydrostatique, qui porte le nom de l'immortel géomètre, le mit sur la voie, et il reconnut qu'une certaine quantité d'argent avait été mélangée à l'or dans la confection du diadème royal. Archimède faisait,

dit-on, peu de cas des applications pratiques de la géométrie et des sciences ; mais il fut loin de les négliger, et l'on cite une foule d'inventions de ce genre dues à son génie. C'est à lui qu'on attribue l'invention des aréomètres, instruments basés immédiatement sur le principe que tout corps immergé ou flottant dans un liquide déplace, quand l'équilibre est établi, un volume de liquide ayant précisément le même poids que le poids du corps; c'est ce même principe, découvert et démontré par Archimède, qui lui rendit facile la solution du problème de la couronne. D'autres historiens des sciences ont regardé comme auteur de la découverte des aréomètres la belle et savante Hypatie, cette malheureuse victime du fanatisme religieux des moines d'Alexandrie. Ce qui paraît plus certain, c'est que ces petits appareils, si précieux, doivent à un physicien moderne, Homberg, leur forme actuelle.

Nous avons décrit les aréomètres spécialement destinés à mesurer avec la rigueur nécessaire la densité des corps (voyez *Phénomènes de la physique*). Il nous reste à parler de l'usage qu'on fait, dans l'industrie et le commerce, d'appareils semblables et portant le même nom, et dont l'objet est d'utiliser le principe d'Archimède à la détermination de la composition de certains mélanges.

Ce sont ordinairement des tiges cylindriques de verre, lestées à leur partie inférieure par de la grenaille de plomb ou du mercure que renferme un appendice globulaire. Le poids d'un appareil ainsi construit étant invariable, — ce qui lui a fait donner le nom d'*aréomètre à poids constant*, par opposition aux *aréomètres à poids variable*, — la partie immergée est d'autant plus longue que le liquide a une moindre densité, puisque le liquide déplacé doit toujours avoir un poids égal à celui de l'instrument.

L'eau pure est le liquide qui sert de terme de comparaison : c'est donc au point de la tige où l'instrument affleure dans l'eau que se trouve le zéro de la graduation. Mais, au lieu de faire une graduation unique pour les liquides ou mélanges plus denses

que l'eau et pour les plus légers, on a trouvé plus commode de construire deux sortes d'aréomètres pour les deux catégories.

La figure 16 représente l'aréomètre de Baumé, qu'on nomme *pèse-sels*, *pèse-acides*, quelquefois *pèse-sirops*, *pèse-vinaigre*, selon ses usages, parce qu'il sert à déterminer la concentration plus ou moins forte d'une dissolution saline, la densité d'une combinaison hydratée, c'est-à-dire d'un acide et de l'eau. Le



Fig. 16. — Pèse-sels ou pèse-acides, ou aréomètre de Baumé.

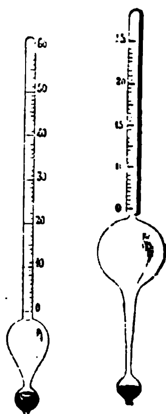


Fig. 17. — Pèse-liqueurs, pèse-éther.

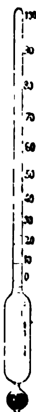


Fig. 18. — Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.

zéro occupe un point de l'extrémité supérieure de la tige ; plongé dans une dissolution renfermant 15 parties en poids de sel marin et 85 d'eau, l'aréomètre affleure en un point plus bas où l'on marque 15 : la division de l'intervalle de 0° à 15° en quinze parties égales, prolongée jusqu'au bas de la tige, fournit la graduation.

Le point extrême du *pèse-sels* de Baumé est 60° : c'est là que s'arrête l'aréomètre dans l'acide sulfurique monohydraté ; 36° correspond à l'acide azotique, 26° à l'acide chlorhydrique.

Le *pèse-liqueurs*, qu'on nomme encore *pèse-alcool*, *pèse-esprit*, *pèse-éther*, est employé pour comparer les liquides d'une densité moindre que celle de l'eau. Il est construit de façon que, plongé dans l'eau pure, le point d'affleurement se

trouve vers le bas de la tige (fig. 17). La graduation se fait en marquant zéro au point dont nous parlons ; portant ensuite l'aréomètre dans une dissolution de 10 pour 100 de sel marin, on divise l'intervalle en 10 parties égales, qu'on porte au-dessus du zéro, jusqu'au 50e degré environ : c'est une échelle suffisante pour les besoins de l'industrie et du commerce.

Les expressions usitées : *alcool à* 36°, *alcool à* 40°, indiquent donc que le *pèse-liqueurs* de Baumé, plongé dans une liqueur alcoolique ou spiritueuse, affleure aux divisions 36 ou 40 de l'aréomètre ainsi gradué.

On construit des aréomètres pour vérifier la richesse du vin en alcool ; on les nomme alors *pèse-vin* ou *œnomètres* ; d'autres pour reconnaître si le lait est ou non étendu d'eau : ce sont les *pèse-lait* ou *galactomètres*.

L'*alcoomètre centésimal* de Gay-Lussac (fig. 18) a sur celui de Baumé un grand avantage : sa graduation n'indique pas seulement la force comparative en alcool des mélanges d'alcool absolu et d'eau, il donne instantanément la proportion en centièmes des volumes de l'esprit et de l'eau. Ainsi, quand l'instrument, plongé dans un mélange, marque 70°, c'est que ce mélange renferme en réalité 70 parties d'alcool pur et 30 parties d'eau. Gay-Lussac, pour graduer un aréomètre centésimal, le plongeait successivement dans des mélanges renfermant 0, 10, 20, 30, ..., 100 d'alcool absolu, opération délicate et laborieuse, parce que le mélange des deux liquides détermine une contraction et une élévation de température, de sorte qu'il fallait attendre qu'ils fussent refroidis à une même température (celle de 15° centigr.) et calculer la proportion nouvelle des deux volumes.

L'alcoomètre centésimal est officiellement adopté par la France pour la vérification des eaux-de-vie, des esprits et de toutes les liqueurs alcooliques, dont la circulation est soumise à des droits. En Allemagne, on emploie celui de Tralles, qui ne diffère de celui de Gay-Lussac que par la température de la graduation (60° Fahrenheit ou 15° 5/9 centigr.).

Il importe de remarquer que les divers appareils dont nous venons de donner la description ne renseignent qu'indirectement sur la densité des mélanges liquides où on les plonge, sans donner cette densité même ; on a, du reste, calculé des tables donnant cette densité pour chaque degré. Mais ils n'indiquent rien sur la composition même du mélange, qui peut être altéré par l'introduction de substances étrangères à sa composition normale.

§ III — Niveaux d'eau — Niveaux a bulle d'air

Les surfaces libres d'un même liquide dans les vases communiquants sont, dès qu'il y a équilibre, dans un même plan hori-

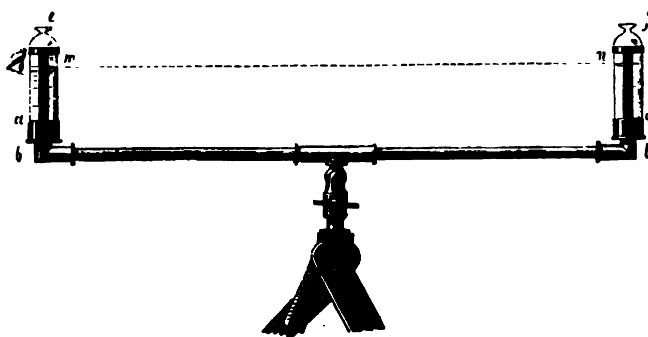


Fig. 19. — Niveau d'eau.

zontal. Cette propriété fondamentale des liquides a été utilisée pour construire un instrument très-simple, dont se servent les géomètres dans leurs opérations de nivellement. Cet instrument, qu'on nomme le *niveau d'eau*, se compose d'un long tube métallique *bb* dont les deux extrémités se recourbent à angle droit et portent verticalement deux fioles de verre ouvertes à leur partie supérieure. Pour opérer, on remplit d'eau le tube, de façon que le liquide monte aux trois quarts environ des fioles. Si alors, le tube étant disposé à peu près horizontalement, on vise les deux

surfaces de l'eau dans les fioles, suivant une ligne tangente intérieurement *mn*, la ligne de visée sera assurément horizontale. En tournant l'instrument sur son axe dans une autre direction, la nouvelle ligne de visée sera pareillement horizontale et dans le même plan que la première, pourvu que les diamètres des tubes de verre soient rigoureusement les mêmes. On peut donc ainsi déterminer des points de même niveau au-dessus du terrain, et, par une série d'opérations que nous n'avons pas à décrire ici, obtenir les diverses altitudes du sol.

Les *niveaux à bulle d'air* servent, comme les niveaux d'eau, à vérifier l'horizontalité d'une ligne ou d'un plan; mais leur construction est basée sur un principe de physique différent.

Imaginez un tube de verre fermé de toutes parts, enchâssé dans une monture de métal qui laisse voir une partie du tube (fig. 20). Il est entièrement rempli d'un liquide, d'eau, d'alcool ou d'éther (ces derniers sont préférables à l'eau, parce qu'ils ne gèlent point), sauf un fort petit espace que remplit une bulle d'air ou de vapeur. En vertu de la loi d'équilibre des fluides de densité différente, la bulle gazeuse se trouvera toujours au point du tube qui est verticalement le plus élevé. Le tube étant placé sur une platine métallique, si cette platine est inclinée à l'horizon, la bulle montera du côté le plus élevé du tube : elle ne resterait rigoureusement au point milieu que si le tube et la platine étaient dans un plan parfaitement horizontal; mais comme la plus petite inclinaison dans un sens ou dans l'autre l'amènerait à l'une ou à l'autre des extrémités du tube, pour obvier à cet inconvénient, le tube est légèrement convexe à sa partie supérieure, et l'on obtient plus facilement le mouvement de la bulle vers ce point. On est donc assuré de l'horizontalité du plan de la platine, quand, après quelques oscillations, on voit la bulle se loger de sorte que ses extrémités occupent les mêmes divisions

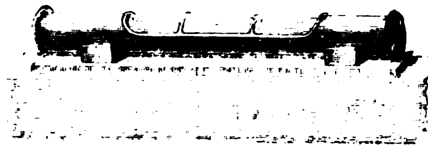


FIG. 20. — Niveau à bulle d'air ou de vapeur.

de part et d'autre du sommet de la convexité du tube. Pour obtenir l'horizontalité d'une surface, on donne à cette surface la forme d'une platine triangulaire munie de vis calantes (fig. 21): on dispose d'abord le niveau parallèlement à l'une des bases du triangle, et en mouvant convenablement l'une des deux vis, on obtient une première ligne horizontale. Plaçant alors le niveau dans la direction de la hauteur du triangle, on se sert de la troisième vis pour obtenir l'horizontalité de cette seconde ligne. Le plan de la surface est alors nécessairement horizontal, puisqu'il passe par deux lignes qui le sont elles-mêmes.

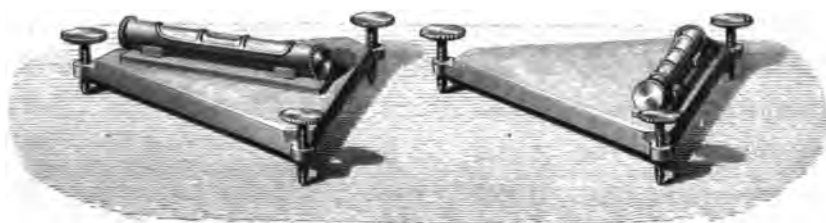


FIG. 21. — Horizontalité d'un plan obtenue à l'aide du niveau à bulle de vapeur.

Le niveau à bulle d'air donne des résultats plus précis que le niveau d'eau ; aussi est-il employé de préférence dans les opérations de géodésie ou même dans les travaux de nivellement d'une certaine importance. Tous les instruments de précision dont certaines parties doivent conserver, pendant les observations, une direction horizontale ou verticale rigoureuse, sont munis de niveaux à bulle d'air. Tels sont, par exemple, la plupart des instruments de géodésie et d'astronomie.

§ IV — Puits artésiens — Jets d'eau

C'est encore sur le principe de l'égalité de hauteur des liquides dans les vases communiquants qu'est basée la construction des puits artésiens. Il est bien entendu que cette condition n'est pas la seule et que la connaissance géologique des couches de terrain,

des nappes d'eau sous-jacentes, est indispensable. Mais nous nous bornerons à peu près, dans ce que nous avons à dire de cette importante application des sciences, au point qui touche au chapitre correspondant de la physique.

Bien avant que la science fût parvenue à ces connaissances, les fontaines jaillissantes ou puits artésiens existaient. Les anciens Égyptiens, les Chinois, savaient forer des puits d'où l'eau s'élevait et sortait sous forme de jets ou de ruisseaux abondants. En France, l'ancienne province d'Artois possédait depuis longtemps des puits de ce genre, et c'est là l'origine de la dénomination sous laquelle on les connaît aujourd'hui. Voici comment la théorie rend compte du phénomène :

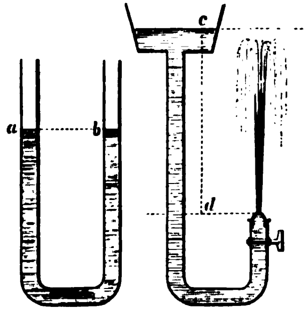


Fig. 22. — Principe des jets d'eau et des puits artésiens.

Si l'on prend un tube à deux branches recourbées en U, l'eau qu'on verse dans l'une des branches pénètre dans l'autre, et, dès que l'équilibre est établi, le niveau de l'eau est à égale hauteur en *a* et en *b* dans l'une et dans l'autre. Imaginons maintenant que l'une des branches soit plus courte que l'autre et fermée d'abord par un robinet, que la branche la plus longue soit surmontée d'un réservoir plein d'eau. Si le niveau *c* de l'eau dans celui-ci surpasse de *cd* la hauteur du niveau au sommet de la branche la plus courte, le liquide exercera sur le fond une pression équivalant au poids d'une colonne d'eau de hauteur *cd* ; de sorte que si, en ouvrant le robinet, on laisse cette pression s'exercer librement, elle fera jaillir le liquide à une hauteur qui serait égale à *cd*, sans la résistance qu'oppose à son mouvement le frottement contre les parois du tube et celle de la masse d'air déplacée par le jet. Nous supposons d'ailleurs que le réservoir ait une capacité telle (s'il n'est pas alimenté par une source constante), que son niveau ne varie pas lui-même d'une manière sensible pendant l'expérience.

On voit, d'ailleurs, qu'en se basant sur cette propriété de

l'équilibre des liquides dans les vases communiquants, on explique les jets d'eau artificiels qui ornent les parcs, jardins, places publiques, etc., ainsi que les bornes-fontaines.

Or, un puits artésien n'est autre chose qu'un trou de sonde foré à travers les couches supérieures du sol et allant, à des pro-

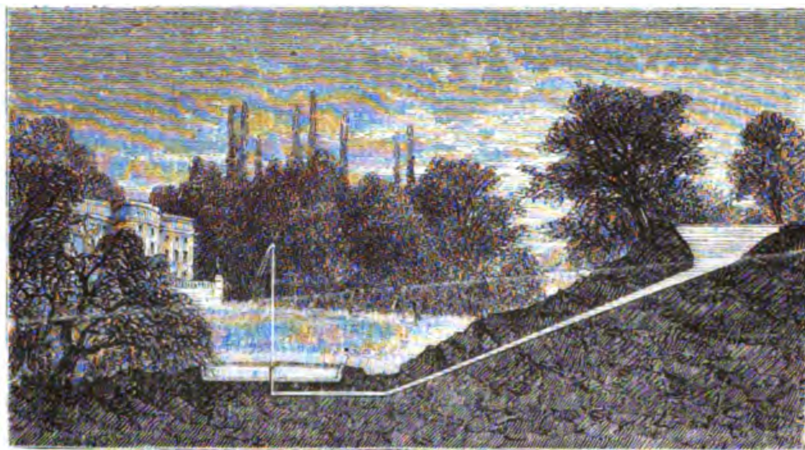


FIG. 23. — Jet d'eau

fondeurs variables selon les terrains, rencontrer une nappe d'eau souterraine emprisonnée entre des couches imperméables. Ces nappes liquides suivent les sinuosités et inclinaisons des couches; il suffit donc, pour que l'eau monte dans le puits, qu'il y ait,

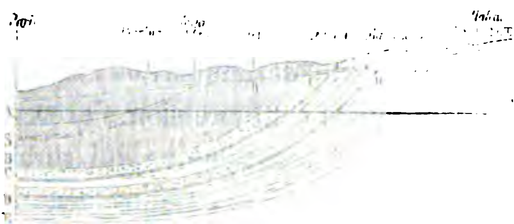


FIG. 24. — Coupe géologique du bassin de la Seine, entre Paris et Langres.

entre le point atteint par la sonde et le niveau de la nappe à une distance quelconque, une certaine différence de hauteur. On voit un exemple de ce fait dans la coupe géologique des terrains qui constituent le sol parisien, depuis Paris jusqu'au niveau

supérieur du bassin, au plateau de Langres. Les couches de sable aquifère qu'on a rencontrées à des profondeurs de 548 et de 570 mètres, pour le forage des puits artésiens de Grenelle et de Passy, sont surmontées par une série de roches,

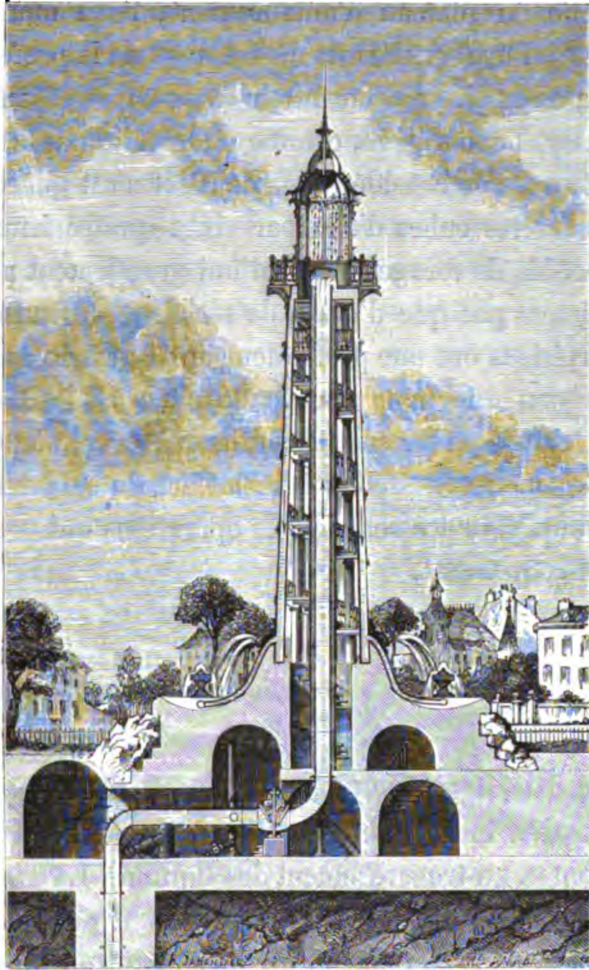


FIG. 25. — Puits artésien de Passy.

notamment par une couche de craie d'une épaisseur considérable. Toutes ces assises vont, en se relevant progressivement, affleurer en des points d'autant plus éloignés, que leur profondeur relative est plus grande. Le sable aquifère n'émerge qu'au plateau de Langres. Sur toute l'étendue du bassin où a lieu cet

affleurement, la couche de sable reçoit les eaux pluviales qui s'infiltrent et descendent dans toute sa profondeur, constituant ainsi comme une succession d'immenses tubes recourbés où la nappe liquide est de plus en plus comprimée. On comprend dès lors qu'en creusant un puits en un point dont l'altitude est inférieure à celle du plateau d'affleurement, l'eau montera dans le puits, et jaillira au-dessus du sol dès que la profondeur du forage sera assez grande pour atteindre la nappe d'eau en question. A Passy, l'eau s'élève, comme on le voit dans la figure 25, à une hauteur assez considérable. Le débit n'est guère moindre de 17 000 mètres cubes d'eau par vingt-quatre heures.

Les procédés de forage, aujourd'hui grandement perfectionnés, ne laissent pas que d'offrir de sérieuses difficultés, quand les puits artésiens ont une profondeur aussi grande que ceux du bassin parisien que nous venons de citer. Si les trépans, les cuillers et leurs tiges (ce sont les outils qui servent à perforer les roches et à ramener les débris à la surface du sol) viennent à se briser, il faut, pour les retirer, des opérations qui peuvent être longues et coûteuses [1].

§ V — Pipette — Entonnoir magique — Bouteille inépuisable

On a vu dans le *siphon* (*Phénomènes de la physique*, liv. I) une application intéressante et utile de la pression de l'air à l'écoulement et au transvasement des liquides. La *pipette* est un petit instrument qui a un objet analogue. Il permet de puiser dans un vase, dans un tonneau qu'on ne peut ou qu'on ne veut remuer, une portion de liquide. C'est un tube à bec effilé, de fer-blanc ou de verre, qu'on plonge dans le liquide et qui se remplit, soit par simple communication, soit par aspiration.

Une fois pleine, on tient la pipette comme le montre la figure 26,

1. Nous renvoyons, pour la description détaillée du forage d'un puits artésien, aux ouvrages spéciaux, parmi lesquels le *Guide du sondeur*, de M. Degousée, et à l'*Hydraulique* de M. Marzy (*Bibl. des merveilles*).

en posant le doigt sur l'ouverture supérieure; puis on la retire du vase. La pression atmosphérique qui s'exerce sur le liquide à l'ouverture effilée suffit pour le maintenir dans le tube; mais si l'on vient à soulever le doigt et à rendre l'air, la pression extérieure s'exerce à la surface interne, contrebalance celle qui pressait et retenait le liquide inférieur, et le liquide s'écoule par son poids.

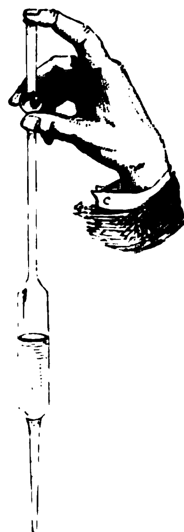


Fig. 26. — Pipette.

On peut, du reste, arrêter l'écoulement et le faire recommencer à volonté, par le simple mouvement du doigt. C'est ce que font les faiseurs de tours de physique amusante avec l'*entonnoir magique* et la *bouteille enchantée* ou *inépuisable*. On va se rendre aisément compte du jeu de ces appareils.

La figure 27 représente l'entonnoir magique. On voit que c'est un entonnoir à doubles parois, dont la cavité intérieure et invisible est remplie d'un liquide, de vin, par exemple. Une petite ouverture, pratiquée près de l'anse, se ferme ou s'ouvre avec le pouce, et un petit trou intérieur fait communiquer la capacité pleine de liquide avec le tuyau intérieur apparent de l'entonnoir. Le pouce levé, le vin coule. L'écoulement cesse à la volonté de l'opérateur, s'il ferme l'ouverture supérieure.



Fig. 27. — Entonnoir magique.

Vient-on à verser de l'eau dans la capacité visible de l'entonnoir, c'est de l'eau pure qui coulera, ou un mélange d'eau et de vin, selon que l'ouverture de l'anse sera maintenue fermée ou au contraire ouverte. Les spectateurs croient

donc que l'on peut ainsi faire à volonté couler de l'eau et du vin de l'entonnoir magique.

La *bouteille inépuisable* est une bouteille à compartiments multiples, dont chacun est rempli d'une sorte de liqueur. Chaque compartiment, ou fiole, communique avec l'extérieur par un petit trou pratiqué dans la paroi de la bouteille, et que l'opé-

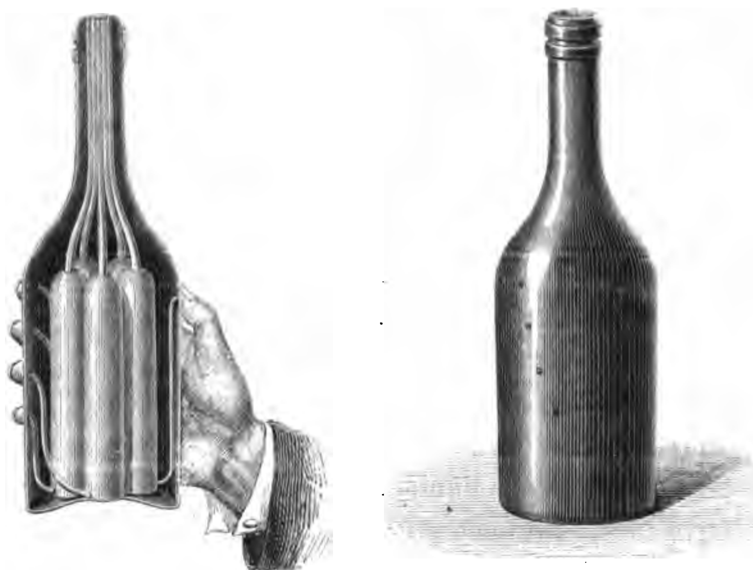


Fig. 28. — Bouteille inépuisable.

rateur ouvre ou ferme à volonté avec les doigts. Il peut donc verser l'espèce de liqueur qu'il lui plaît, ou que le spectateur demande, ou même composer un mélange en versant de deux ou plusieurs liqueurs à la fois.

Ces expériences de physique amusante sont principalement basées sur l'action de la pression atmosphérique, dont nous allons maintenant étudier des applications plus sérieuses et surtout plus utiles.

CHAPITRE III

LES POMPES — CHEMINS DE FER ET POSTE PNEUMATIQUES

§ I — Les Pompes — La pression atmosphérique employée à l'élévation de l'eau

Un corps de pompe, ou cylindre, dans lequel un piston fait le vide par un mouvement de va-et-vient; un tuyau de longueur plus ou moins considérable communiquant, d'une part avec la partie inférieure du corps de pompe, de l'autre avec un réservoir d'eau ou un puits, et dans lequel l'air se raréfie en même temps et par la même manœuvre que l'air du corps de pompe : telles sont les principales dispositions de la *pompe aspirante*, telle qu'on l'emploie dans une foule de circonstances, et notamment pour les usages domestiques. Le principe de l'ascension de l'eau est ici, comme nous l'avons montré dans les *Phénomènes de la physique*, la pression atmosphérique, qui s'exerce avec toute sa force à la surface du réservoir, tandis qu'elle est annulée, ou du moins diminuée, à l'intérieur du tuyau, et de la partie du corps de pompe située au-dessous du piston

La figure 29 montre comment on installe ordinairement une pompe de ce genre au-dessus d'un puits, quand la profondeur du puits est inférieure à 7 ou 8 mètres au-dessous du point où l'eau doit monter. Théoriquement, l'eau devrait s'élever dans le tuyau d'aspiration à une hauteur de $10^m,33$, quand la pression barométrique est 760 millimètres; mais, en réalité, l'ascension est beaucoup moindre, parce que le mécanisme ne fonctionne pas

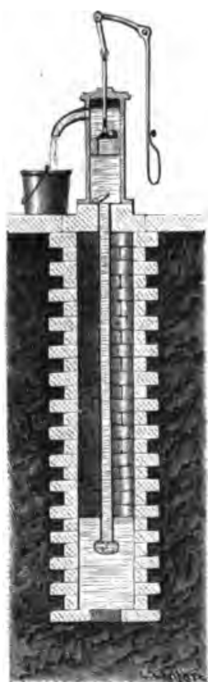


FIG. 29. — Pompe aspirante.

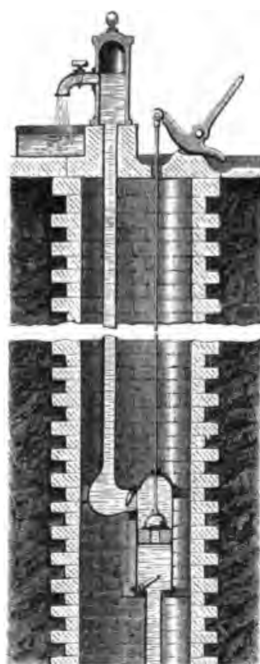


FIG. 30. — Pompe aspirante et foulante, dite *élévatoire*.

avec la perfection qui serait nécessaire. Il y a des fuites par les joints; de plus, l'eau contient en dissolution de l'air qui vient, sous la forme de bulles, remplir la cavité du vide. Le mouvement de l'eau, le frottement du liquide contre les parois, ses agitations, déterminent des pertes de force, et la hauteur de l'ascension se réduit le plus souvent aux 7 à 8 mètres dont nous venons de parler.

Si la profondeur du puits est plus considérable, la pompe aspirante ne peut suffire; on la complète par une disposition qui

permet de refouler l'eau à une hauteur plus considérable, et de la conduire ainsi du point où elle est arrivée par aspiration jusqu'au point où elle doit être employée.

La pompe est alors une *pompe aspirante et élévatoire*, ou mieux, aspirante et foulante. La figure 30 en donne un modèle généralement adopté pour les puits profonds. C'est tout simplement une pompe aspirante dont le corps cylindrique est fixé à l'intérieur du puits à une profondeur suffisante pour que l'eau y arrive par aspiration. Là elle est refoulée à chaque mouvement ascendant du piston dans un réservoir installé à l'intérieur du puits, et dans le tuyau qui fait communiquer ce réservoir au corps extérieur de la pompe. Quand le piston descend, le poids de l'eau accumulée fait fermer la soupape supérieure latérale, de manière à éviter le retour de cette eau dans le corps de pompe. Il en résulte qu'après un certain nombre de coups de piston, nécessaire pour amorcer l'appareil, l'eau se déverse d'une façon intermittente par le robinet. Il est clair que la même disposition permettrait de refouler l'eau à une hauteur quelconque, et de la faire monter, par exemple, aux différents étages d'une maison.

On donne aux pompes et aux différents organes qui les composent une multitude de formes et d'agencements divers, dont la description détaillée demanderait des volumes; mais les détails dont nous parlons, ne changeant rien au principe physique sur lequel est basée la construction des pompes, n'offriraient point ici d'intérêt. Tantôt ces modifications sont commandées par la destination particulière des pompes; tantôt elles résultent de la façon dont l'inventeur a conçu le fonctionnement de l'appareil pour remédier à tel inconvénient, ou obtenir tel avantage spécial.

Dans le but d'éviter l'intermittence du jet, on construit quelquefois des pompes aspirantes et foulantes à double effet. Ce sont des pompes disposées de telle sorte que l'aspiration et le refoulement de l'eau se font à la fois, et pendant la montée, et pendant la descente du piston. Dans ces appareils, le piston

est plein, et le corps de pompe est percé de quatre ouvertures munies de soupapes, comme le montre la figure 31. Pendant le mouvement ascensionnel du piston, la soupape A s'ouvre, et une certaine quantité d'eau s'introduit par aspiration dans la partie inférieure V du corps de pompe; la soupape B est fermée par celle que contient déjà le tuyau de refoulement C'; au contraire, la soupape A' s'ouvre et donne passage à l'eau contenue en V au-dessus du piston, et cette eau est refoulée vers C'; enfin, la pression de cette eau ferme la soupape B'. Dans le mouvement descendant du piston, les choses se passent d'une façon opposée : les soupapes A et A' sont fermées, B et B' sont ouvertes, de sorte que l'eau est aspirée par le haut et refoulée par le bas. Le jet est donc à peu près continu; mais il est facile de comprendre que la manœuvre du levier, balancier ou manivelle, exige un effort double. Ce genre de pompe est surtout employé pour les travaux d'épuisement, et alors on adapte à la machine un balancier mû par deux ou plusieurs hommes.



Fig. 31. — Pompe à double effet

La nature du moteur qui donne aux pistons des pompes leurs mouvements de va-et-vient peut d'ailleurs être très-variée. Les pompes ordinaires, destinées aux usages domestiques et de petit modèle, sont munies de leviers oscillant autour d'un point fixe et qu'on fait mouvoir à bras d'homme, ou bien d'une manivelle qu'on tourne de la même manière. Mais quand on a besoin d'une force plus considérable, pour des pompes plus puissantes, on emploie comme moteur, tantôt un cheval faisant tourner un manége, tantôt la vapeur, tantôt la force développée par une chute d'eau. La machine élévatoire du pont Notre-Dame, démolie depuis quelques années, était une pompe mue par l'intermédiaire de roues hydrauliques établies en un point de la Seine où

la rapidité du courant donnait une force disponible considérable. Il en était de même de l'ancienne machine de Marly, qui élevait les eaux de la Seine jusqu'aux châteaux royaux de Marly et de Versailles, à l'aide de 14 roues hydrauliques communiquant le mouvement à 221 pompes. Aujourd'hui, de nouvelles roues, au

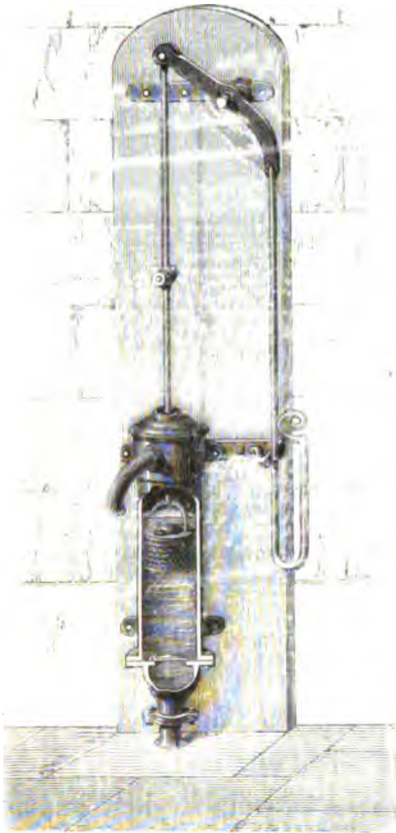


Fig. 32 — Pompe domestique à balancier.



Fig. 33. Pompe à manivelle.

nombre de 4 seulement, faisant mouvoir chacune 4 pompes horizontales, fournissent une quantité d'eau beaucoup plus grande que celle de l'ancienne machine, ce qui peut donner une idée des perfectionnements apportés aux constructions mécaniques depuis deux siècles. Les pompes de Chaillot sont mues par la vapeur. C'est aussi une machine à vapeur, établie à une centaine de

mètres du bord de la Seine, qui donne le mouvement aux pompes alimentant d'eau la ville de Fontainebleau. Les immenses travaux de desséchement entrepris en Hollande ont été longtemps effectués par des pompes qui avaient le vent pour moteur. En 1840, plus de 2500 moulins à vent étaient encore



FIG. 34. — Nouvelles roues hydrauliques et pompes de Marly.

employés à cet usage. A la même époque, on a entrepris le desséchement du lac de Harlem à l'aide d'une machine à vapeur de 350 chevaux, qui faisait mouvoir 11 pompes, dont le débit moyen était de 475 000 mètres cubes par vingt-quatre heures[1].

Dans les pompes utilisées pour les grands travaux hydrauliques, les divers organes des machines doivent être construits avec une grande solidité, à cause des pressions et résistances considérables qu'ils ont à subir. Le piston est alors le plus sou-

1. Voyez, pour plus de détails sur les grands travaux de ce genre effectués à l'aide de pompes ou d'autres appareils, l'intéressant ouvrage de la *Bibliothèque des merveilles*, l'*Hydraulique* de M. Marzy, auquel nous empruntons quelques-uns des renseignements qu'on vient de lire.

vent un cylindre métallique massif, tel que le représente la fig. 35. On lui donne le nom de *piston plongeur*.

Le mécanisme qui sert à produire l'aspiration de l'eau dans les pompes aspirantes n'est pas toujours un piston se mouvant alternativement de haut en bas et de bas en haut dans un corps cylindrique, et faisant le vide du côté du tuyau qui amène le liquide. Dans certaines pompes, qu'on nomme *oscillantes*, c'est une pièce fixe, oscillant autour d'un axe, qui joue le rôle du piston, et qui à la fois aspire l'eau en faisant le vide par l'une de ses parties, tandis qu'elle foule l'eau amenée déjà par le mouvement de l'autre partie. La figure 36 représente la pompe oscillante de Bramah, en coupe, et permet aisément de voir quel est le jeu de la pièce mobile et des soupapes.



FIG. 35. — Piston plongeur.

Dans les pompes *rotatives* (la figure 37 reproduit la coupe de la pompe de Stoltz), les tuyaux d'aspiration C et de refoulement C′ viennent aboutir, par deux ouvertures *a* et *a′*, dans un tambour circulaire A, à l'intérieur duquel se meut un anneau concentrique au tambour B. Des pièces *pppp*, s'appuyant, d'une part sur le contour intérieur du tambour, de l'autre sur le contour d'un excentrique, ferment hermétiquement l'espace annulaire, et par suite font le vide derrière elles en foulant l'eau en avant : elles jouent le rôle d'autant de pistons.

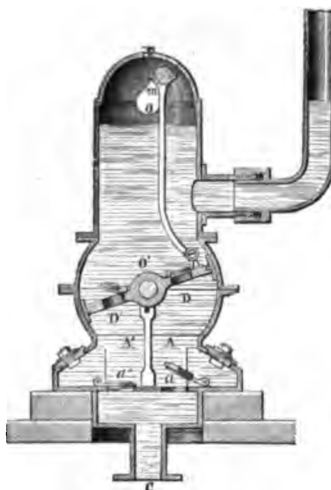


FIG. 36. — Pompe oscillante de Bramah. — C, *a*, *a′*, tuyau et soupapes d'admission. — A, A′, capacités séparées par une cloison. — DD′, piston oscillant autour de l'axe O′. — O*m*, manivelle donnant le mouvement au piston.

La pompe rotative système

Behrens (fig. 38), qui fonctionne aussi comme machine à vapeur (voyez plus loin le chapitre consacré aux Machines à vapeur), est d'un mécanisme encore plus simple.

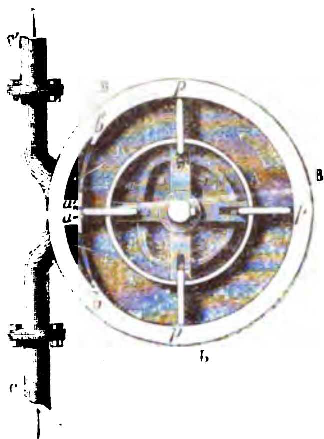


FIG. 37. — Pompe rotative de Stoltz.

Un moteur quelconque, la vapeur, par exemple, met en mouvement un arbre qui, par un système d'engrenages, fait mouvoir en sens contraire les axes C,C' de deux pistons. Ceux-ci tournent à l'intérieur d'un tambour communiquant avec le tuyau B d'aspiration et le tuyau D de refoulement. Chaque piston, E,E', a la forme d'une portion de couronne massive qui laisse libre un espace annulaire *aa'*. Quand cet espace commence à se placer en face de l'orifice d'admission, le piston E, par son mouvement, agrandit de plus en

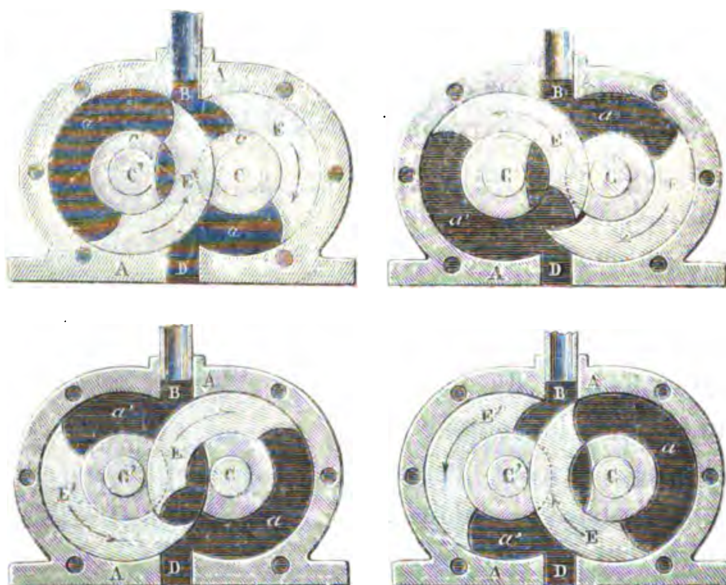


FIG. 38. — Pompe rotative de Behrens : phases d'un mouvement de rotation.

plus derrière lui la capacité libre; le vide se fait de plus en plus, et une certaine quantité d'eau le remplit; pendant ce

temps, l'autre piston foule par l'orifice de conduite l'eau qui s'y trouvait déjà. A chaque demi-tour, les deux pistons échangent leurs fonctions : celui qui aspirait refoule, et réciproquement, de sorte que la pompe est à un certain point une pompe à double effet. On se rendra compte aisément des circonstances de ce double effet en examinant ce qui se passe en un tour entier de rotation, en comparant, par exemple, sur la figure 38, les positions respectives des pistons et des espaces *aa'*, après les intervalles successifs de chaque quart de la rotation totale.

Il nous reste à dire un mot des pompes foulantes, pour compléter ce qui concerne ce paragraphe, bien que, nous l'avons dit plus haut, leur construction ne soit nullement basée sur le principe de l'action de la pression atmosphérique.

§ II — Les Pompes a incendie

Les pompes à incendie, les pompes dont on se sert pour l'arrosage des jardins, sont des pompes de ce genre.

Les pompes à incendie (fig. 39) sont habituellement composées de deux pompes foulantes accouplées, fixées au réservoir d'eau, qu'on remplit, soit à l'aide de seaux et en formant la chaîne, soit à l'aide des tuyaux de prise d'eau installés dans les villes, à Paris, par exemple.

Elles sont mues à l'aide d'un balancier, auquel viennent s'articuler les tiges ou bielles des deux pistons. Ceux-ci se meuvent en sens contraire, de sorte que l'eau arrive d'une façon continue dans la capacité où plonge le piston de refoulement. Cette capacité contient de l'air qui, étant comprimé par l'eau dont elle se remplit à chaque instant, exerce une pression sur le liquide : on la nomme pour cela *réservoir d'air*. La vitesse avec laquelle l'eau s'échappe de la lance dépend donc de cette pression, et comme celle-ci varie peu si le réservoir d'air est d'une capacité suffisante, il en résulte que la vitesse du jet reste à peu près constante.

On a construit récemment des pompes à incendie dont le moteur est la vapeur. Celle que nous reproduisons ici (fig. 40) est munie d'une chaudière du système Field, qui produit en

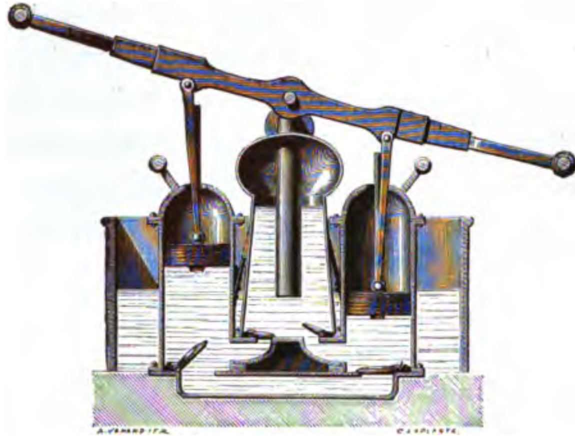


FIG. 39. — Pompe à incendie à balancier.

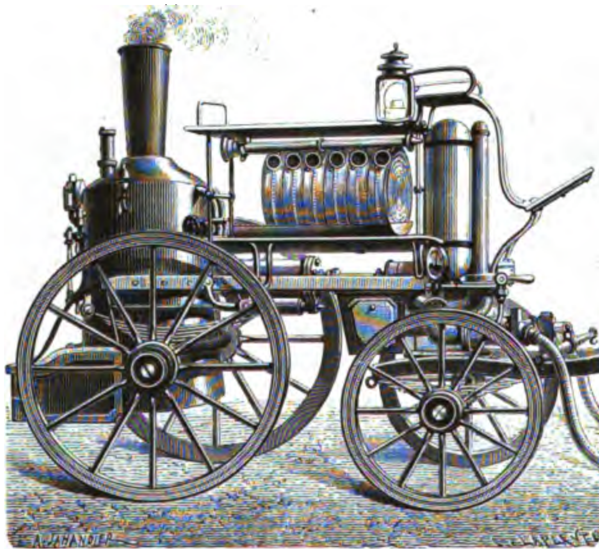
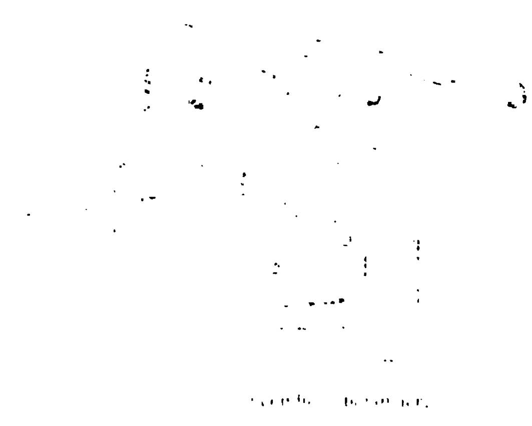


FIG. 40. — Pompe à incendie à vapeur.

huit minutes, à la pression nécessaire, la transformation de l'eau froide en vapeur. Elle est assez puissante pour fournir un débit de 900 litres d'eau par minute et lancer le jet à 45 mètres de hauteur.



[illegible]



[illegible]



[illegible]

[illegible] la [illegible]
[illegible] pour [illegible]
[illegible] le jet à la [illegible]



J. Ferat lith.

Fornet, Chromolith.

MANŒUVRE DE LA POMPE A INCENDIE A VAPEUR

Nous devons citer aussi la pompe à incendie à vapeur d'un habile constructeur, M. A. Thirion, laquelle se compose de trois corps de pompe attelés sur un même arbre, qui reçoit le mouvement des bielles de deux cylindres à vapeur latéraux. Avec un orifice de 56 millimètres, elle donne un jet portant à 50 mètres.

On comprend quelle est l'importance de cette invention pour les villes populeuses où la violence des incendies et leur étendue exigent la promptitude des secours et l'efficacité des moyens d'extinction.

§ III — Machines pneumatiques, ou Pompes a air et a gaz

Les machines pneumatiques sont de véritables pompes à air ou à gaz, offrant toutefois cette particularité, que le fluide qu'elles retirent d'une capacité hermétiquement close, puis refoulent à l'extérieur, diminue progressivement de densité, sans qu'on puisse amener cette densité à zéro, c'est-à-dire produire le vide parfait. Les expériences scientifiques exigent donc que les machines pneumatiques soient construites avec une grande perfection, afin que le vide relatif obtenu approche autant que possible de ce vide idéal. En réalité, on arrive, avec les plus parfaits de ces appareils, à réduire à 0,1 de millimètre la pression du gaz ou de l'air qui reste au bout de l'opération dans le récipient. Mais il n'est pas nécessaire d'obtenir un vide aussi parfait dans les applications industrielles ; et il y a avantage alors à se servir d'une machine pneumatique inventée et construite par un habile fabricant d'instruments de précision, M. Deleuil. Cette machine, que la Planche III représente dans une vue d'ensemble et dont le piston et le corps de pompe sont dessinés sur une plus grande échelle dans la figure 41, diffère des machines ordinaires par un côté intéressant et original. Le piston, au lieu d'être lubrifié avec de l'huile, afin que le contact, aussi parfait que possible entre sa surface et celle

du corps de pompe, empêche toute fuite d'air, ne touche pas en réalité le corps de pompe; il est en outre sillonné de rainures parallèles et équidistantes. L'intervalle très-petit ($0^{mm},02$) que le constructeur laisse ainsi entre les deux surfaces est rempli par une mince couche d'air. Or, l'expérience prouve que l'adhérence de ce bourrelet gazeux pour la surface du piston est telle, qu'il remplace très-bien le corps gras dont le piston est ordinairement enduit; en un mot, sa présence suffit à intercepter toute communication entre les capacités du corps de pompe situées au-dessus et au-dessous du piston. M. Deleuil donnait d'abord à ce dernier une hauteur double de son diamètre, et il obtenait un vide de 8 à 18 millimètres, selon la capacité. Depuis, bien qu'il ait donné au diamètre du piston une valeur égale à celle de sa hauteur, il a pu, avec sa machine, obtenir un vide de 2 à 3 millimètres dans une capacité de 14 litres; en un quart d'heure, il a obtenu un vide de 10 millimètres dans un récipient de 250 litres.

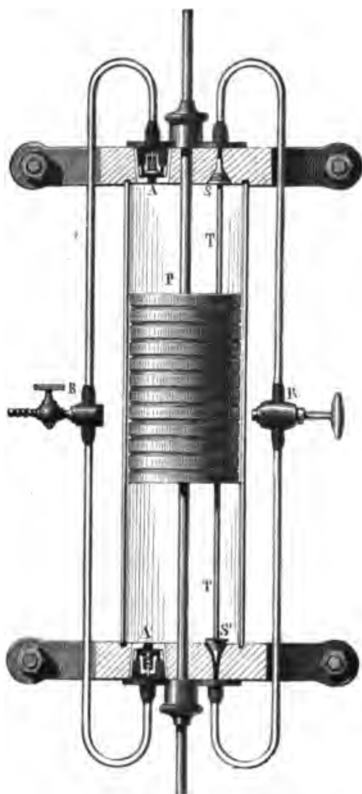


FIG. 41. — Piston de la machine pneumatique de M. Deleuil.

§ IV — LES CHEMINS DE FER ET LA POSTE ATMOSPHÉRIQUES

Un mot maintenant des applications industrielles de la machine pneumatique. Une des plus importantes a été l'emploi qu'on en a fait pendant quelque temps, sur quelques lignes de chemins de fer, pour obtenir, sans le secours de locomotives, le

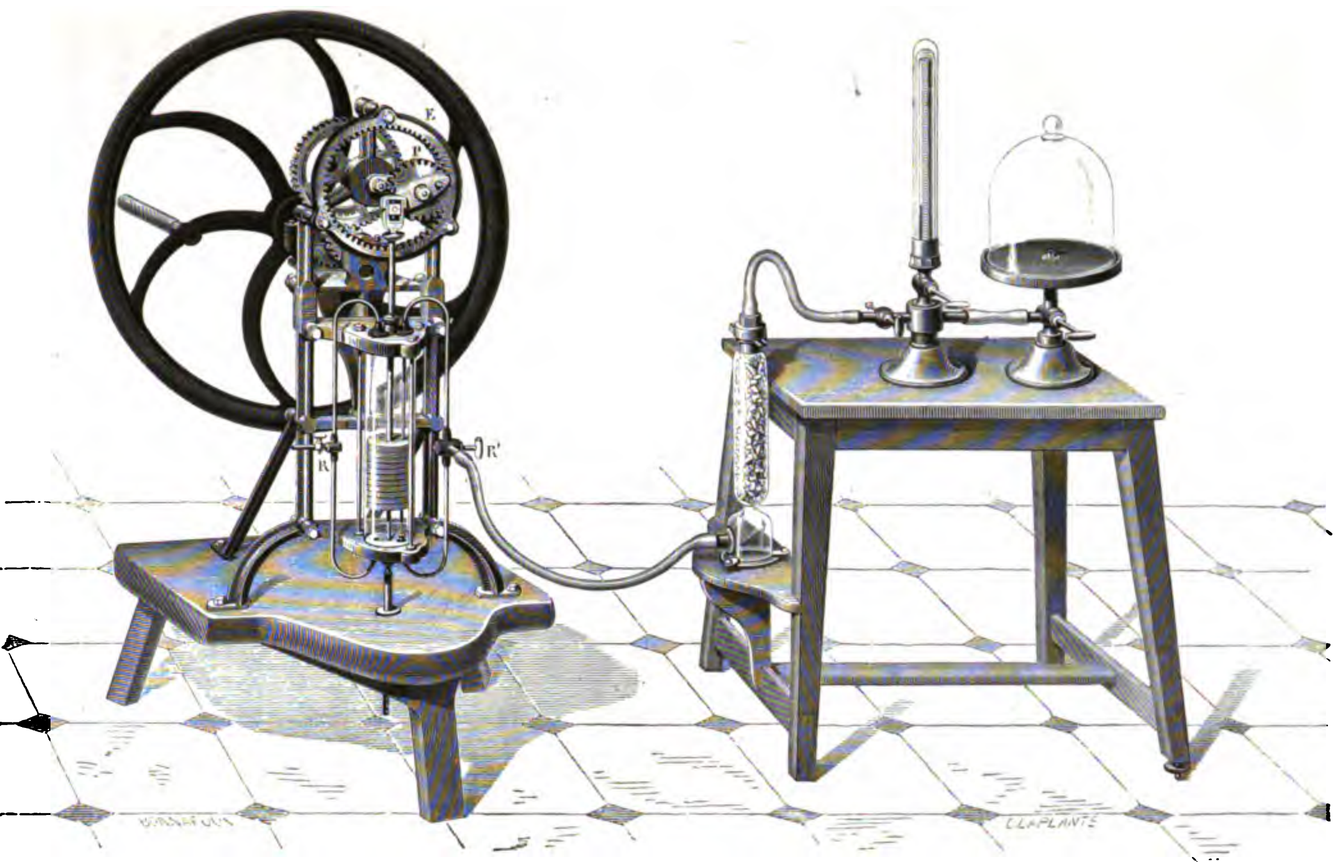


PLANCHE III — MACHINE PNEUMATIQUE DE M. DELEUIL.

mouvement d'un train. Le principe de cette application est bien simple, il consiste en ceci : Sur toute la longueur de la voie ferrée est fixé un tube ou tuyau métallique, à l'intérieur duquel peut se mouvoir un piston. Qu'à l'aide d'une machine pneumatique on fasse le vide dans le tuyau d'un des côtés du piston, la pression atmosphérique, s'exerçant de l'autre côté sur sa surface, fera mouvoir le piston et les corps pesants auxquels il est solidement relié. Si ces corps pesants sont les wagons d'un train, le mouvement de propulsion du piston se communiquera à ces wagons, et pourra, si la force ainsi obtenue est suffisante, les faire rouler sur les rails, sans le secours des moteurs ordinaires.

L'idée de faire servir la pression atmosphérique comme force motrice est ancienne : elle remonte aux premières expériences que fit l'inventeur de la machine pneumatique, Otto de Guericke. En 1810, un ingénieur suédois, D. Medhurst, proposa de transporter les marchandises, les paquets, les lettres, dans un tube où l'on ferait le vide ; puis, de communiquer le mouvement du piston à des voitures circulant extérieurement au tube. En 1824, un Anglais, Wallance, conçut l'idée de transmettre directement aux wagons la pression de l'atmosphère ; les wagons devaient alors voyager à l'intérieur même du tube où l'on faisait le vide. Enfin, en 1848, le premier chemin de fer atmosphérique fut construit en Irlande, sur une longueur de près de 3 kilomètres, entre Kingstown et Dalkey. Les ingénieurs, MM. Clegg et Samuda, avaient repris, en le perfectionnant, le système de Medhurst. Plusieurs autres essais en furent faits en Angleterre, à Pouth-Devor, à Croydon, et, en France, sur une portion de la ligne de Paris à Saint-Germain. Aujourd'hui, tous les chemins atmosphériques ont été abandonnés, non que le fonctionnement mécanique en fût mauvais, mais parce que, au point de vue économique, ce mode de traction était devenu inférieur à celui des locomotives : il était beaucoup trop coûteux. L'invention des locomotives de montagnes propres à l'ascension des fortes rampes a eu pour conséquence forcée l'abandon dont nous venons de parler.

La figure 42 représente une section diamétrale du tube de 63 centimètres, à l'intérieur duquel voyageait le piston, dans le chemin de fer atmosphérique du Pecq à Saint-Germain. Ce tube, fixé au milieu de la voie, était percé d'une fente longitudinale par laquelle passait la lame ou tige reliant le piston au premier wagon. En avant du piston ou du côté du vide, la fente restait

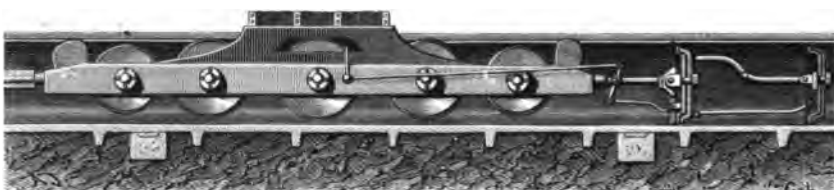


FIG. 42. — Tube pneumatique du chemin de fer atmosphérique de Saint-Germain.

fermée par une bande de cuir garnie de courtes lames de tôle, faisant fonction de soupape, et une série de galets de diamètres décroissants, portés par le châssis du piston, soulevait cette soupape à mesure que s'avançait la lame reliant la tige du piston au train.

Le vide était fait dans le tube par des machines pneumatiques, composées de quatre corps de pompe et mues par une machine à vapeur. Les dimensions du tube et des machines avaient été calculées de manière à donner une vitesse de 1 kilomètre par minute, en supposant un train à remorquer du poids de 54 tonnes et en se bornant à un vide relatif d'une pression d'un tiers d'atmosphère. La rampe, assez forte ($0^{m},035$), du Pecq à Saint-Germain, est, depuis 1859, franchie par des locomotives.

CHAPITRE IV

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'AIR COMPRIMÉ

§ I — Le Fusil a vent

On vient de voir comment on peut utiliser la pression atmosphérique comme force motrice. Il suffit, pour cela, de faire le vide à l'aide de machines ou pompes pneumatiques dans l'espace où doit se mouvoir le véhicule : la différence des pressions qui s'exercent l'une d'un côté, l'autre de l'autre côté du mobile faisant l'office de piston, tel est le principe du mouvement. Cette différence de pression peut s'obtenir d'une autre façon : on peut, au lieu de raréfier, comprimer l'air dans un espace ou réservoir clos. La force élastique avec laquelle cet air pressera contre les parois pourra alors être utilisée de diverses manières, et donner lieu à des applications dont nous allons passer en revue les plus importantes.

On a vu, d'ailleurs, dans les *Phénomènes de la physique*, quelle disposition on donne aux machines qui servent à comprimer soit l'air, soit d'autres gaz : ce sont des pompes qui ne diffèrent de la machine pneumatique qu'en ce que le jeu des soupapes est renversé.

Le fusil à vent est une des plus anciennes applications de l'air comprimé : on en fait remonter l'invention à 1560; et même il paraît que les anciens connaissaient une machine analogue, puisque, d'après Philon, Ctésibius aurait construit un tube hors duquel une flèche était lancée par la force de l'air comprimé. Quoi qu'il en soit, l'arquebuse à vent a été quelque temps en usage dans les armées. Aujourd'hui, ce n'est plus qu'une arme de curiosité. En voici le mécanisme fort simple.

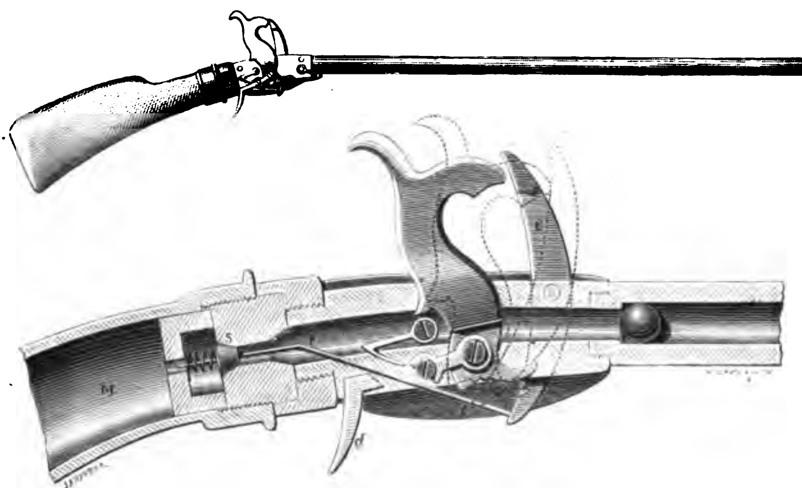


Fig. 43. — Le fusil à vent : vue et coupe.

La crosse du fusil est creuse et métallique; c'est le réservoir à l'intérieur duquel on comprime l'air avec une pompe de compression. Autrefois cette pompe était logée dans la crosse même, et le réservoir d'air comprimé était l'espace annulaire compris entre le canon du fusil et un cylindre de plus fort calibre qui enveloppait celui-ci. La crosse communique avec la culasse, ou partie du canon où vient s'appuyer le projectile, par un orifice muni d'une soupape conique S, que l'air comprimé maintient habituellement fermé, mais qui peut s'ouvrir par le jeu du mécanisme de la batterie représentée en détail dans la figure.

En appuyant sur la détente *d*, le chien s'abaisse sur la pièce *e*

dont la partie inférieure pousse une tige *tt'* communiquant avec la soupape, qui, sous cette impulsion brusque, s'ouvre spontanément. Une partie de l'air comprimé sort de la crosse et chasse la balle avec une force qui dépend de la pression à laquelle on s'est arrêté pour charger le fusil à vent. D'ordinaire, on va jusqu'à 8 ou 10 atmosphères; comme l'air ne s'échappe à un premier coup qu'en petite quantité, on peut tirer plusieurs balles de suite. Dans les anciennes arquebuses à vent, on logeait ces balles dans un petit réservoir muni d'un robinet, et, à mesure qu'après un coup tiré on ouvrait le robinet, un nouveau projectile prenait dans la culasse la place du premier. Mais il est aisé de comprendre que la force de projection va en diminuant à mesure que le réservoir d'air comprimé se vide, de sorte qu'après un petit nombre de décharges, il y a nécessité de recharger l'arme, c'est-à-dire de comprimer l'air à nouveau.

Le fusil à vent produit une détonation, mais beaucoup moins forte que celle des armes à feu de même calibre. On voit sortir du canon une lumière, qui est sans doute due à l'inflammation des particules solides entraînées par le courant aérien. D'après M. Daguin, cette inflammation provient de l'électricité développée par le frottement de la bourre, et des particules dont nous parlons, contre les parois intérieures du canon.

§ II — Le Forage des tunnels par l'air comprimé

Dans les travaux de l'industrie contemporaine, la force de l'air comprimé a été et est encore utilisée dans diverses circonstances. Citons les exemples les plus remarquables de cette application.

En première ligne, il faut mentionner le forage de l'immense souterrain, aujourd'hui terminé, qui traverse les Alpes un peu au sud du mont Cenis, et qui relie les stations de Bardonnèche

et de Modane, stations extrêmes, celle-ci française, celle-là italienne, du chemin de fer de Victor-Emmanuel. Il y avait là plus de 12 000 mètres de galerie à ouvrir dans la roche, à des profondeurs qui ne permettaient point l'emploi des procédés ordinaires de percement des souterrains, c'est-à-dire par des puits forés de distance en distance, dans l'axe de la galerie projetée.

Le creusement de ce long tunnel ne pouvant se faire que par deux points opposés, il parut à peu près impossible d'employer la vapeur et la poudre pour forer les trous de mine, abattre et broyer les roches : à mesure qu'on eût avancé plus profondément sous terre, on aurait éprouvé des difficultés croissantes pour aérer les ateliers, pour substituer de l'air pur à de l'air vicié par le mélange des gaz de la poudre et de la vapeur d'eau, par la combustion des lampes, et par les gaz provenant de la respiration des ouvriers. Les ingénieurs[1] songèrent à mettre en pratique une idée que Colladon et plus tard de Caligny avaient émise, celle d'employer l'air comprimé comme force motrice des machines qui devaient servir à percer les trous de mine dans la roche. Les compresseurs, ou machines servant à comprimer l'air dans les réservoirs ou récipients, empruntaient eux-mêmes leur puissance à une chute d'eau voisine (le ruisseau du Melezet à Bardonnèche, et à Modane la petite rivière de l'Arc). A l'origine, c'étaient des *compresseurs à choc* ou à *coups de bélier*, ainsi nommés de la façon dont l'eau agissait dans trois tubes verticaux, munis de soupapes pour refouler l'air dans le récipient. L'eau de la chute arrivait par le tuyau A, dont la soupape *a* était alternativement ouverte et fermée pendant que la soupape *b* du tuyau B était elle-même fermée et ouverte; une petite machine spéciale produisait le jeu de ces soupapes. Trouvant *a* ouverte et *c* fermée, l'eau, avec sa vitesse acquise, pénétrait dans le tuyau C, et, en montant, comprimait l'air amené de l'extérieur par la soupape *e*. Celle-ci se fermait,

1. MM. Sommeillier, Grandis et Grattone.

tandis que l'air, comprimé de plus en plus, forçait la soupape *d* et s'introduisait dans le récipient R. Alors la soupape *b* s'ou-

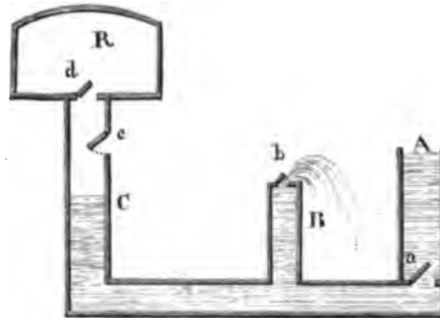


FIG. 44. — Compresseur à coups de bélier. — Figure théorique.

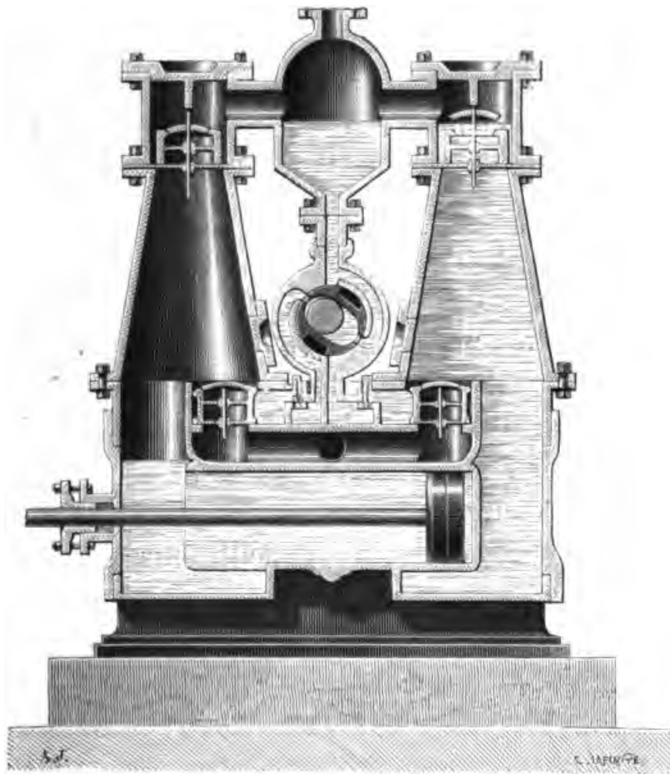


FIG. 45. — Compresseur à double effet, système Fryer (de New-York).

vrant, tandis que *a* se fermait, l'eau s'échappait par le tuyau B, *c* s'ouvrait et laissait s'introduire une nouvelle quantité d'air

extérieur, qu'une manœuvre nouvelle devait comprimer et introduire de nouveau dans le récipient R.

Depuis, les ingénieurs ont substitué aux compresseurs à choc des compresseurs à double effet, d'un mécanisme plus simple et tirant mieux parti de la force de la chute. Voici quelques détails sur la façon dont ont fonctionné ces machines à Modane.

Douze pompes de compression reçoivent leurs mouvements de six roues hydrauliques mues directement par la chute de l'Arc. Chacune d'elles consiste en un piston qui reçoit un mouvement de va-et-vient dans un corps cylindrique horizontal. Aux deux extrémités du cylindre, sont ajustés deux tuyaux verticaux munis chacun de deux soupapes : une soupape d'aspiration, celle qu'on voit à la partie inférieure du tuyau de forme conique, soupape prenant l'air à l'extérieur, et une soupape d'expulsion, introduisant l'air comprimé par l'ascension de l'eau et lui permettant de pénétrer dans le réservoir correspondant. Le mouvement du piston, en foulant l'eau dans l'un des cylindres, abaisse son niveau dans l'autre. L'air est donc comprimé dans le premier, raréfié dans le second.

En tenant compte des pertes occasionnées par les fuites, les douze compresseurs comprimaient en moyenne, par vingt-quatre heures, 116 000 mètres cubes d'air à la pression ordinaire, et la pression à laquelle cet air était fourni aux machines perforatrices atteignait 7 atmosphères.

Une quantité d'air aussi considérable n'eût pas été nécessaire, si l'on n'avait eu besoin que de la force faisant mouvoir les forets. A la vérité, le tuyau qui conduit l'air comprimé des réservoirs de compression au fond de la galerie fournit à la fois de la force pour les machines perforatrices, et de l'air pour l'aérage des ateliers et de toute la galerie.

Un mot maintenant des machines perforatrices. Elles étaient installées, au nombre de dix, sur un affût qui pouvait rouler, avancer ou reculer sur des rails; un second chariot, sorte de tender à la suite de l'affût, portait les réservoirs d'eau et d'air comprimé (voyez la Planche IV). L'air comprimé, introduit



PLANCHE IV — MACHINE PERFORATRICE DU TUNNEL DU MONT CENIS.

par un tiroir dans un cylindre muni d'un piston, communiquait à ce dernier et à sa tige le mouvement de va-et-vient qui, transmis aux fleurets, déterminait le choc répété des outils sur la roche. Mais, outre ce mouvement longitudinal ou de choc, chaque fleuret était animé de deux autres mouvements, indispensables à la nature du travail que devait exécuter chacun

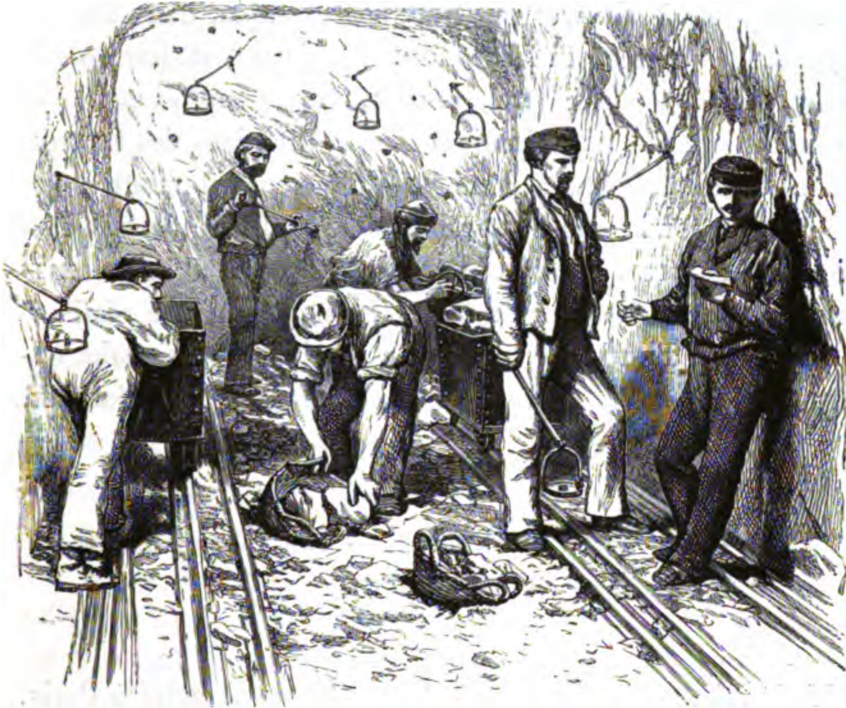


FIG. 46. — Déblaiement des débris dans le tunnel des Alpes.

d'eux. En creusant son trou, il devait peu à peu tourner sur lui-même comme une vrille, et en outre il devait avancer à mesure que le trou devenait plus profond. Ces deux mouvements étaient produits par une petite machine latérale mue, comme l'autre, par l'air comprimé, et servant à la fois à régler le mouvement du tiroir de la première, à agir sur une roue à rochet qui entraînait avec elle le piston et le fleuret, et à faire avancer le cylindre à mesure que le forage du trou de roche avançait lui-même.

Chaque perforatrice pouvait fournir 200 coups de fleuret par minute, consommant à chaque coup un peu moins d'un litre d'air comprimé. Quant à l'avancement du travail, il dépendait de la nature et de la dureté de la roche.

Le succès de cette application de l'air comprimé comme force motrice, dans une entreprise qui ne pouvait que très-difficilement employer la vapeur, a suggéré l'idée d'étendre l'emploi de cette force à d'autres travaux : par exemple, dans tous les pays où les cours d'eau fournissent des chutes, et, par conséquent, des forces motrices naturelles, on pourrait les employer à comprimer l'air, qui, circulant avec facilité dans des tuyaux, pourrait être distribué à domicile à toute une population ouvrière, et résoudre ainsi le problème de la distribution économique de la force. En attendant que cet emploi et cette transformation de la force inhérente aux chutes d'eau se réalisent et deviennent d'un usage général, il est bon d'en signaler encore quelques applications particulières aujourd'hui réalisées.

§ III — La Poste pneumatique — Les Chemins de fer a air comprimé

L'administration des lignes télégraphiques a établi à Paris, il y a quelques années, une communication entre les deux stations du Grand-Hôtel et de la place de la Bourse. Un tube de 1100 mètres de longueur, de $0^{m},065$ de diamètre, relie, à chacune de ses extrémités, deux chambres qui servent à introduire dans le tube ou à en extraire le piston porteur des dépêches. Ce piston, de forme cylindrique, n'est autre chose qu'une boîte fermée par un bout, et munie à l'autre d'un couvercle mobile. C'est à l'intérieur que les dépêches, mises sous enveloppe, sont placées. Une garniture de cuir permet au piston de s'adapter exactement contre les parois du tube, de manière à s'opposer au passage de l'air comprimé.

Chaque chambre peut être mise à volonté en communication, à l'aide de deux robinets, soit avec l'air libre extérieur, quand il s'agit de recevoir les dépêches, soit avec le réservoir d'air comprimé, s'il s'agit d'expédier le *piston-chariot*.

Quant à la compression de l'air, elle s'opère d'une façon très-simple et très-économique, à l'aide de la pression de l'eau des réservoirs de la ville, qui, à chacune des deux stations, équivaut environ à une chute de 15 mètres de hauteur. Trois cuves de tôle sont, à cet effet, installées dans le voisinage de chaque station : l'une reçoit l'eau qui refoule, à mesure qu'elle emplit la cuve, l'air situé au-dessus et le comprime dans les deux autres cuves. En vidant la première par le moyen d'un robinet qui met sa paroi supérieure en communication avec l'air libre, puis la laissant de nouveau remplir par l'eau des conduites, on peut réitérer plusieurs fois de suite la même opération, et obtenir dans les deux autres cuves l'air comprimé à la pression nécessaire. Trois minutes suffisent pour obtenir ce résultat, et le piston, chassé dans le tube par la force de l'air comprimé, arrive à destination en 90 secondes, ce qui donne une vitesse moyenne de 12 mètres par seconde.

Il est évident que, toutes réserves faites sur la dépense d'installation des conduites et des appareils, le même système pourrait être appliqué avantageusement au transport des lettres et des paquets de petites dimensions dans tous les quartiers d'une ville comme Paris. Il en résulterait certainement une grande économie de temps pour l'expédition et la distribution des correspondances, si multipliées et si actives.

Le *pneumatic Dispatch* de Londres n'est établi que sur une distance de 500 mètres, entre la station d'Euston et celle du bureau de poste d'Eversholt street. Le tube dans lequel se meuvent les wagonets porteurs de dépêches forme un petit tunnel de fonte de $0^m,84$ de diamètre portant une couple de rails à sa partie inférieure. Les wagons sont des boîtes creuses de fer, ayant la même forme extérieure que celle du tunnel, avec un dégagement d'environ 3 centimètres entre leurs parois et celles

du tube. Quant à l'appareil moteur, auquel l'inventeur, M. Rammel, a donné le nom d'*injecteur pneumatique*, il est installé à l'une des stations, et il est disposé de manière à produire successivement, soit de l'air comprimé, dont la force motrice pousse par derrière les wagons qui vont à l'autre station, soit un certain degré de vide ou de raréfaction de l'air, qui détermine leur retour. D'après cela, on voit que ce n'est pas seulement la pression atmosphérique qui est utilisée, mais aussi la force emmagasinée dans une certaine quantité d'air comprimé, c'est-à-dire condensé de façon que sa pression surpasse celle de l'atmosphère même. La poste atmosphérique installée à Paris est basée sur l'action seule de l'air comprimé.

M. Rammel, l'inventeur et le constructeur du *pneumatic Dispatch* de Londres, a aussi réalisé la pensée conçue par Wallance, et qui consistait à faire voyager à l'intérieur du tube pneumatique le train lui-même, avec toutes ses voitures, constituant ainsi un gigantesque piston. Une ligne d'essai a été construite par lui dans le parc de Sydenham. La première voiture du convoi porte en avant un disque d'un diamètre un peu inférieur à celui du tunnel, muni sur tout son contour d'un tampon ou brosse, qui suffit à intercepter suffisamment le passage de l'air. Comme dans le tube destiné au transport des dépêches, le vide sert seulement pour produire le retour du train, qui, pendant le voyage d'aller, est poussé, au contraire, par l'air comprimé.

On vient de construire à New-York (États-Unis) un petit chemin de fer atmosphérique d'une faible longueur, menant de Warren street à l'extrémité la moins élevée de la Cité, près de la rivière du Nord. Le tunnel, de forme cylindrique, porte à sa partie inférieure (fig. 47) deux rails sur lesquels se meut un véhicule unique à voyageurs, qui a à peu près le même diamètre que le tunnel à l'intérieur duquel il circule, poussé par la pression de l'air. La figure 48 représente l'intérieur de ce wagon.

On conçoit bien que ces applications de la pression atmosphérique comme force motrice sont plutôt des expériences intéressantes, dont le succès en petit n'a rien de difficile, mais qui, à moins de perfectionnements non encore réalisés, ne paraissent pas susceptibles d'être mises en pratique sur une grande échelle.

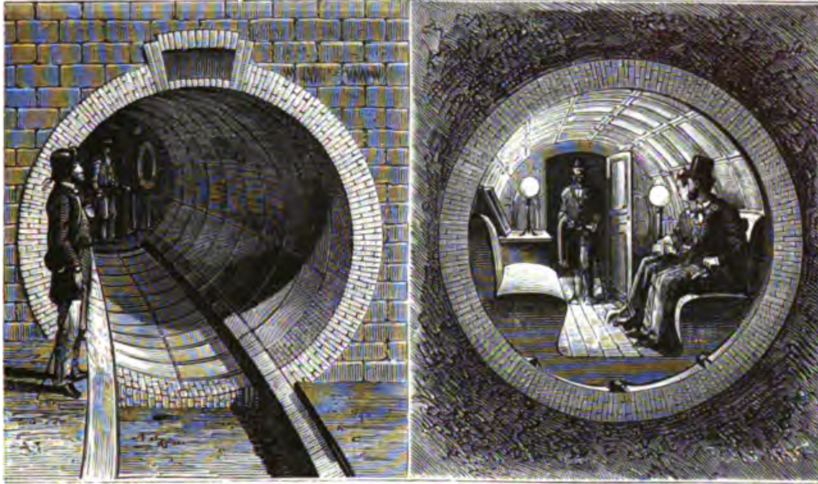


FIG. 47. — Chemin de fer atmosphérique de New-York.

FIG. 48. — Le tube intérieur d'un wagon.

Ce n'est guère que dans les villes très-étendues et très-populeuses qu'un réseau souterrain de tubes pneumatiques pourrait être établi avec de grands avantages pour la circulation rapide des paquets et des dépêches télégraphiques ou postales.

C'est encore la pression de l'eau qui comprime l'air et produit un jet d'eau à la surface d'un réservoir liquide dans l'appareil ingénieux connu sous le nom de *fontaine de Héron*, du nom du mathématicien de l'école d'Alexandrie, à qui l'on en attribue l'invention.

Un réservoir d'eau A communique par un tube qui part de son fond avec l'air libre extérieur ; d'autre part, il communique par un tube plein d'air avec un réservoir C en partie rempli d'eau et que surmonte une colonne d'eau *ab*. De la hauteur de

cette colonne dépend la pression de l'air emprisonné et comprimé entre A et C. Cette pression, en s'exerçant en A sur la surface du liquide du premier réservoir, force l'eau à s'élever dans le tube, et, si la hauteur de ce dernier au-dessus du niveau de cette surface est moindre que la longueur *ab*, le liquide jaillira en formant un jet qui, théoriquement, serait précisément égal à leur différence ; il s'élèverait jusqu'en *a'*, si la ligne *a'b'* est prise égale à la hauteur *ab* ; mais les résistances qu'éprouve l'eau dans son mouvement à l'intérieur du tube et, en outre celle que l'air lui oppose extérieurement, réduisent nécessairement la hauteur du jet.

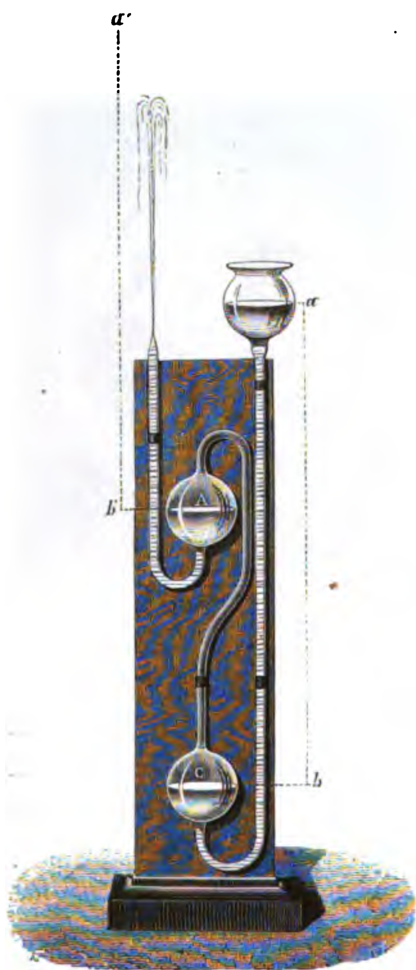


Fig. 49. — Fontaine de Héron.

La fontaine de Héron n'est pas une simple curiosité des cabinets de physique, et c'est pourquoi nous la mentionnons ici. On en a reproduit la disposition et appliqué le principe dans la construction de machines d'épuisement. Telles sont les machines des mines de Schemnitz, en Hongrie, machines qui ne sont autre chose que de gigantesques fontaines de Héron, construites, bien entendu, avec la solidité nécessaire à une application de ce genre.

§ IV — Fondation des piles de pont par l'air comprimé

L'air comprimé a reçu encore une application d'un autre genre, qui n'est pas moins intéressante que celles dont on vient de lire la description. On l'a employé pour refouler l'eau dans les caissons métalliques destinés à former les fondations des piles de ponts : c'est à un ingénieur français, M. Triger, qu'est due la première idée et l'application de la première méthode de ce genre. Des procédés différents ont été employés suivant les circonstances et les vues des ingénieurs qui ont appliqué cette méthode ; mais, comme le principe physique est le même, il suffira d'en décrire un sommairement pour faire comprendre les autres. Voici en quoi consiste celui qui a été adopté pour la construction du pont de Kehl, sur le Rhin :

La figure 50 représente l'installation d'un des chantiers de fondation, et, à l'intérieur de l'un des caissons déjà descendu au-dessous du lit du fleuve, les ouvriers qui travaillent aux déblais.

Imaginez une énorme caisse de tôle aux parois solidement boulonnées et renforcées, tant à l'intérieur que sur la face supérieure, à l'aide de poutres et contre-forts de fer. Cette caisse, de forme rectangulaire, est ouverte à sa base inférieure, tandis que le plafond, percé de trois ouvertures circulaires, est surmonté de trois cheminées de tôle : les deux cheminées latérales, communiquant simplement à l'intérieur du caisson, sont surmontées chacune d'une chambre à air ; celle du milieu descend jusqu'au-dessous de la base inférieure du caisson. Supposez qu'on descende cette sorte de cloche à plongeur au fond du fleuve, de manière que sa base ouverte repose sur le lit de gravier : l'eau pénétrera toute sa capacité et, en vertu de la loi d'équilibre des liquides dans les vases communiquants, elle s'élèvera dans les trois cheminées au niveau de l'eau du fleuve. Si maintenant, à

l'aide de machines soufflantes ou pompes de compression mues à la vapeur (on voit ces machines installées sur un bateau. à droite du dessin), on fait pénétrer l'air dans les deux cheminées latérales, on comprend que la pression de plus en plus considérable du fluide, supérieure à la pression extérieure de l'atmosphère, refoulera peu à peu l'eau qui remplit le caisson, la

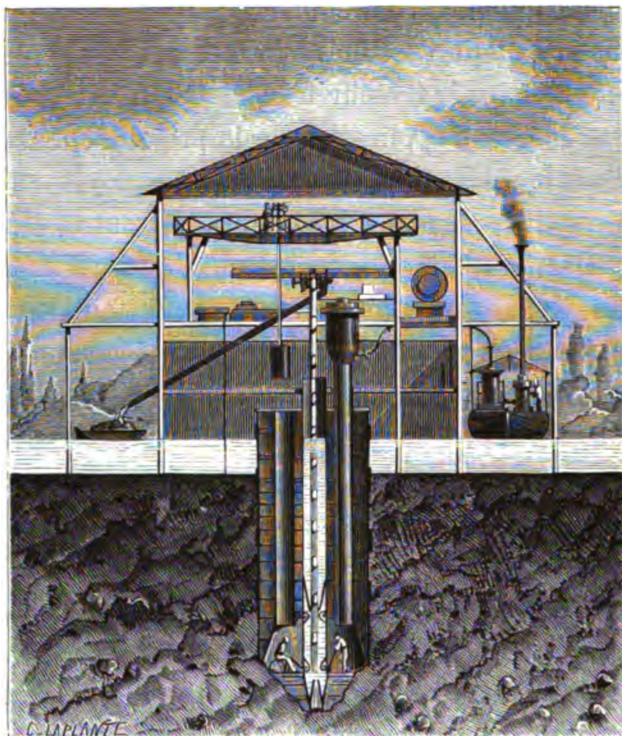


Fig. 50. — Fondation des piles du pont de Kehl par l'emploi de l'air comprimé.

forcera à s'échapper par les fissures des bords inférieurs, et mettra à nu, pour ne pas dire à sec, le lit de gravier sur lequel il repose. Seule la cheminée du milieu, qui pénètre jusque dans le gravier, continuera à être pleine d'eau. Les ouvriers chargés de creuser les fondations descendent alors, par l'intermédiaire de chambres formant écluses et par les cheminées latérales, à l'intérieur du caisson plein d'air comprimé. Sous la protection d'une pression de 2 à 3 atmosphères, qui les garantit contre

l'envahissement des eaux du fleuve, ils fouillent le sol, dont ils rejettent les débris vers la base de la cheminée centrale. Une drague ou noria, enfermée dans cette cheminée, remonte avec ses godets et déverse à l'extérieur, dans un bateau, les déblais de la fondation. D'ailleurs la maçonnerie, construite à mesure sur le plancher supérieur, presse par son poids le caisson et le force à descendre jusqu'à ce qu'on soit arrivé à la profondeur voulue. Alors les ouvriers remontent le caisson, et les trous des trois cheminées sont remplis de béton : la fondation est achevée.

Le pont de Kehl est formé de deux culées et de quatre piles : les deux piles extrêmes reposent chacune sur quatre caissons; les deux autres, moins fortes, sur trois caissons seulement.

Ajoutons que le travail dans des chambres où l'air est à une pression aussi forte n'est pas sans danger pour la santé des ouvriers.

§ V — Mesure des hauteurs ou altitudes des lieux géographiques par le baromètre

Les expériences que Pascal fit faire en 1648, au pied et au sommet du puy de Dôme, celles qu'il fit lui-même en haut et en bas de la tour de Saint-Jacques la Boucherie, à Paris, avaient pour objet de vérifier si la pression de la colonne d'air atmosphérique était bien la vraie cause de l'ascension du mercure dans le tube de Torricelli. En même temps que la théorie nouvelle sortit victorieuse de l'expérience, une application importante du baromètre se trouva, par le fait, réalisée.

Il est clair, en effet, qu'un baromètre peut servir à la mesure des hauteurs, et qu'en notant les deux chiffres différents auxquels la colonne de mercure s'élève à deux stations d'altitudes inégales, de la différence des deux niveaux on doit pouvoir conclure la différence des deux altitudes. Cela suppose à la vérité

que l'on connaît le rapport des densités de l'air et du mercure, et que cette densité ne varie point dans l'épaisseur de la couche qui sépare les deux stations.

Supposons-nous placés en un lieu où la température de l'air soit 0°, la pression barométrique 760 millimètres (c'est la pression moyenne au niveau de la mer). Dans ces conditions, le mercure, à volume égal, pèse 10 500 fois autant que l'air. Une hauteur barométrique de 1 millimètre de mercure équivaut donc à une colonne d'air de 10 500 millimètres ou de 10^{m},5, dans l'hypothèse, répétons-le, où les couches d'air successives ne varieraient point en densité ni en température. Le calcul, très-simple, qui consisterait à déduire, pour chaque millimètre de différence dans la hauteur barométrique, une différence correspondante de 10^{m},5 dans l'altitude, n'est donc pas applicable, ou du moins il ne le serait approximativement que pour de très-petites hauteurs.

Les couches d'air, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, diminuent de densité, précisément parce que les pressions qu'elles supportent sont de moins en moins considérables. Halley et Newton ont trouvé la loi de cette variation, et fait voir que si les hauteurs suivent une progression arithmétique, les pressions varient en progression géométrique. En outre, la température, à partir d'une certaine hauteur, va progressivement en diminuant avec l'altitude, et il en résulte, de ce chef, un accroissement de densité dont il faut tenir compte. Enfin, l'état hygrométrique, la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air, a aussi une influence sur la pression.

Le problème est donc beaucoup plus complexe qu'il ne le paraît au premier abord, et la formule que Laplace a donnée n'est pas assez simple pour que nous la rapportions ici [1]. Disons seulement qu'elle exige qu'on observe simultanément à la station

1. On trouvera dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* (1873) la formule complète de Laplace, les tables qui l'accompagnent et permettent d'en calculer les divers termes. Dans les volumes antérieurs à 1852, on trouve une formule plus simple due à Oltmanns, et qui donne les hauteurs par un calcul très-rapide.

inférieure et à la station supérieure : premièrement, la hauteur du baromètre en chaque point ; deuxièmement, la température de l'instrument lui-même, donnée par le thermomètre fixé au baromètre ; enfin, la température de l'air environnant, marquée, par exemple, par un thermomètre à fronde.

Ces trois séries de mesures prises, on pourra en déduire la différence d'altitude des deux stations. Il faut, autant que possible, se mettre à l'abri des variations accidentelles, pour faire les observations dont nous venons de parler. Si les deux stations ont des verticales peu éloignées, on fera ces observations simultanément, ou, si cela n'est pas possible, on aura soin de les recommencer à la station par laquelle on a commencé, afin de s'assurer que, pendant l'intervalle, les éléments n'ont pas varié. Il est, en tout cas, préférable d'opérer à plusieurs reprises et de calculer, à chaque fois, l'altitude cherchée. En prenant la moyenne des résultats, on obtiendra un résultat plus précis.

Les formules supposent que la pression et la température varient avec la hauteur suivant certaines lois, qui ne sont probablement exactes que jusqu'à une faible élévation relative dans l'atmosphère. Aussi, quand on veut les appliquer à la détermination de la hauteur de l'atmosphère même, on trouve des nombres inférieurs à ceux qu'on déduit des observations astronomiques. Par exemple, on trouve seulement 57 kilomètres pour la hauteur de la couche où la pression n'est plus égale qu'à un dixième de millimètre.

CHAPITRE V

LES AÉROSTATS — LA NAVIGATION AÉRIENNE

§ I — Application du principe d'Archimède a l'ascension verticale des corps dans l'atmosphère

Tout corps plongé dans un fluide perd de son poids le poids même du fluide qu'il déplace. Ce principe, dont la découverte remonte, comme on sait, à Archimède, s'applique aux gaz comme aux liquides, et c'est pourquoi nombre de corps légers. la fumée, les vapeurs, les nuages, s'élèvent et restent suspendus dans l'air, au lieu de se précipiter à la surface du sol, comme il arriverait sur une planète dépourvue d'enveloppe gazeuse ou d'atmosphère.

Il suffit pour que cette ascension se produise, que la légèreté spécifique du corps soit moindre que celle de la portion de l'air où il se trouve plongé. A la surface du sol, l'air, à la température de 0° et sous la pression de $0^{m},76$, pèse 1,29, c'est-à-dire que le poids d'un mètre cube d'air est alors de $1^{kil},29$. Dans les mêmes circonstances physiques, un mètre cube de gaz hydrogène a une densité environ quinze fois moindre : il ne pèse que $0^{kil},090$. Imaginons un tel volume de gaz enfermé dans une enveloppe imperméable : la perte de poids qu'il éprouvera

dans l'air sera $1^{kil},29$, et comme le poids du gaz est seulement $0^{kil},09$, c'est avec une force égale à la différence de ces poids, c'est-à-dire égale à $1^{kil},20$, qu'il sera soulevé dans la verticale. Une partie de cette *poussée* ou *force ascensionnelle* sera employée à équilibrer le poids de l'enveloppe solide, et le reste servira à élever le système à une certaine hauteur dans l'atmosphère. Comme les couches de cette dernière ont une densité qui décroît avec la hauteur, la force ascensionnelle ira en diminuant progressivement, jusqu'à ce qu'elle devienne nulle. En ce point, le ballon cessera de s'élever, et s'il continue à se mouvoir, ce sera par le fait des courants aériens qui pourront exister dans la région de l'atmosphère où il est parvenu.

Telle est, en résumé, la théorie de l'aérostation, qui ne fut comprise et appliquée pour la première fois avec succès qu'en 1783, par Joseph Montgolfier. A la vérité, l'idée de s'élever et de se soutenir dans l'air avait suggéré bien longtemps auparavant de nombreux projets plus ou moins chimériques qui n'existèrent la plupart que dans l'imagination de leurs auteurs; les rares tentatives de réalisation et d'exécution échouèrent faute d'une connaissance suffisante des lois de la mécanique et de la physique.

Joseph Montgolfier, qui connaissait sans doute les expériences de Black, de Cavendish, de Cavallo, sur l'ascension de vessies et de bulles de savon gonflées avec du gaz hydrogène (fig. 51), conçut l'idée d'imiter en grand ces expériences, et de les faire servir à l'exploration des régions atmosphériques. Il fit d'abord des ballons de soie ou de papier, qui, gonflés d'hydrogène, s'élevèrent à une certaine hauteur, comme il l'avait prévu, mais pour retomber bientôt, parce que le gaz s'échappait au travers de l'enveloppe perméable. Il substitua alors à l'hydrogène l'air chaud, dont la densité beaucoup plus grande que celle de ce gaz est encore moindre que celle de l'air froid extérieur, et dont la production est plus aisée et moins coûteuse. Le 5 juin 1783, eut lieu à Annonay, devant les états du Vivarais, accompagnés d'une foule immense, la première expérience en grand de Mont-

golfier : un ballon percé à sa partie inférieure d'une ouverture par où montait dans le globe l'air que chauffait un brasier supporté par un panier de fil de fer s'éleva aux applaudissements enthousiastes d'une multitude de spectateurs à une hauteur verticale de mille toises (2 kilomètres).

Moins de trois mois après, l'expérience d'Annonay, dont le retentissement avait été considérable, fut reproduite à Paris,



FIG. 51. — Ascension des bulles de savon gonflées à l'hydrogène.

mais dans des conditions différentes. Le physicien Charles, dans l'ignorance où il était et où Montgolfier avait laissé le public au sujet de la nature du gaz qui remplissait son ballon, eut l'idée de se servir de gaz hydrogène. Il adopta, pour construire l'enveloppe, du taffetas rendu imperméable par un enduit composé de caoutchouc dissous dans l'essence de térébenthine bouillante. L'hydrogène était obtenu par la réaction de l'acide sulfurique sur le fer : on mit plusieurs jours pour produire la quantité de gaz nécessaire au gonflement du ballon. Enfin, le 27 août 1783, le *Globe* (c'était le nom du premier aérostat à gaz hydrogène) s'éleva au champ de Mars en présence d'une foule immense,

et alla, après trois quarts d'heure de navigation, descendre aux environs de Paris, à Gonesse. D'un premier bond il s'était trouvé porté à une hauteur verticale d'environ 1000 mètres; alors il disparut, caché par un nuage, pour reparaître, dans une éclaircie, à une hauteur beaucoup plus grande, et s'éclipser de nouveau dans les nues.

Ce n'est point ici le lieu de faire l'histoire des ascensions aérostatiques, qui se renouvelèrent très-fréquemment à la fin du dernier siècle et dans le nôtre; mais nous devions signaler ces deux premières expériences, non-seulement à cause du bruit qu'elles firent et de l'enthousiasme qu'elles provoquèrent, mais aussi parce qu'elles caractérisent l'une et l'autre deux modes d'ascension différents et deux systèmes d'aérostats, qu'on distingue en donnant le nom de *montgolfières* aux ballons gonflés par l'air chaud, et en réservant celui d'*aérostats* pour les ballons qui sont gonflés à l'aide du gaz hydrogène.

Cette application si brillante des principes de l'hydrostatique et des découvertes nouvelles en physique et en chimie reçut presque du premier coup tous ses développements, bien qu'aujourd'hui même on soit encore éloigné d'en avoir tiré tout le parti possible.

Dans les premières expériences de Montgolfier et de Charles, on s'était contenté de l'ascension des ballons eux-mêmes : l'idée de les faire servir à enlever des voyageurs et à explorer les régions atmosphériques suivit de près. En effet, le premier voyage aérien eut lieu la même année 1783. Le 21 octobre, un jeune naturaliste et physicien, Pilâtre de Rozier, accompagné d'un gentilhomme nommé d'Arlandes, après quelques essais d'ascension en ballon captif, s'élevèrent dans une montgolfière à un kilomètre environ de hauteur, et descendirent sains et saufs à deux lieues de leur point de départ, après avoir traversé tout Paris. Après ce premier et victorieux essai de la conquête des régions aériennes, les ascensions et les voyages se multiplièrent, non sans quelques catastrophes terribles, parmi lesquelles il faut citer celle de l'infortuné et hardi Pilâtre de Rozier, qui

fut précipité en voulant traverser le détroit de France en Angleterre, par imitation de la traversée aérostatique de la Manche que Blanchard et Jeffries avaient effectuée en janvier 1785.



FIG. 52. — Première ascension aérostatique de Pilâtre de Rozier et d'Arlandes, le 21 octobre 1783.

Nous dirons tout à l'heure quelques mots sur les ascensions qui ont eu pour objet l'exploration scientifique de l'air; entrons maintenant dans quelques détails sur la construction et le gonflement des ballons, ainsi que sur les diverses manœuvres employées dans leurs excursions par les aéronautes.

§ II — Les Montgolfières et les Ballons — Construction et gonflement

Le plus souvent les aérostats et les montgolfières ont la forme d'un globe à peu près sphérique terminé à la partie inférieure par un appendice cylindrique ou conique. Il y a toutefois

cette différence, que dans la montgolfière cet appendice est percé d'une ouverture, tandis que dans le ballon à gaz hydrogène il est hermétiquement clos. Cette forme est, du reste, celle que

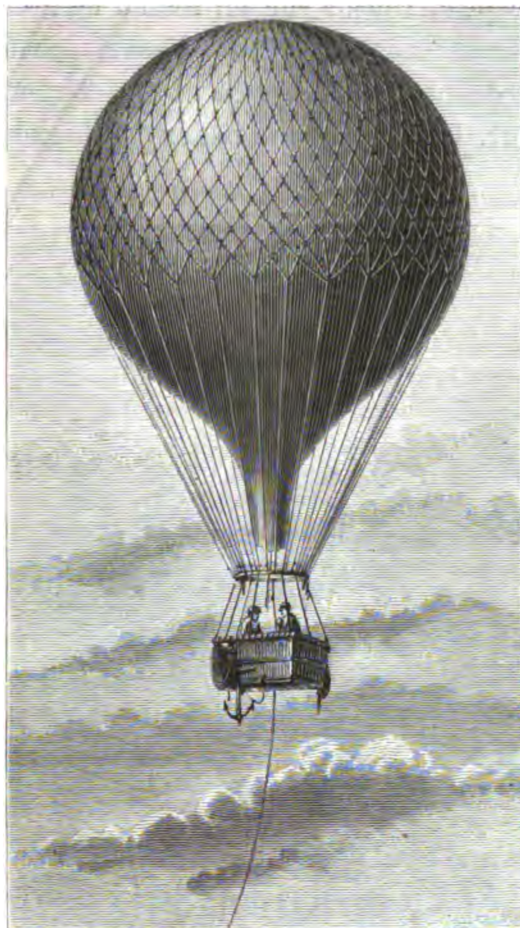


FIG. 53. — Aérostat gonflé au gaz hydrogène.

tendrait naturellement à prendre l'enveloppe sous la pression du gaz élastique qu'elle renferme, si elle était partout également extensible.

L'enveloppe est formée de fuseaux d'étoffe que l'on réunit en les cousant, comme les méridiens d'une sphère : il importe qu'on ne laisse aucune fissure, pas même les trous que font les

piqûres d'aiguilles, et que l'étoffe elle-même soit d'un tissu serré, le plus possible imperméable, pour éviter les fuites de gaz, qui diminueraient promptement la force ascensionnelle. Montgolfier employa pour sa première expérience de la toile doublée de papier, cousue sur un réseau de ficelles fixé aux toiles; dans sa seconde expérience, l'enveloppe était de toile d'emballage, doublée extérieurement et intérieurement d'un papier très-fort. On a vu que le ballon de Charles était de soie

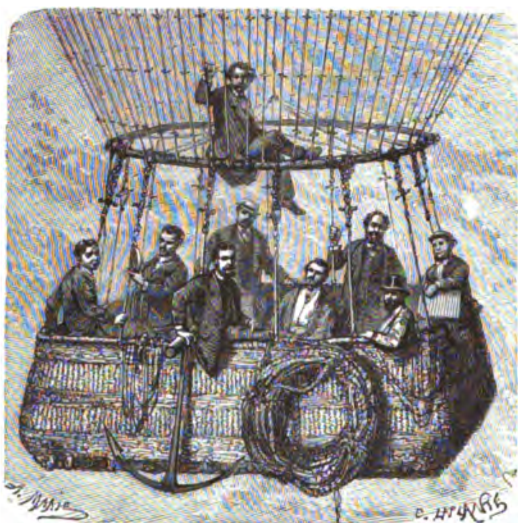


FIG. 54. — Nacelle du ballon *le Pôle nord*.

et recouvert d'un enduit de caoutchouc. Le ballon que MM. Barral et Bixio prirent pour leurs deux explorations de 1850 était rendu imperméable par une couche d'huile de lin épaissie avec de la litharge. Enfin un bon mode de construction consiste à interposer une lame de caoutchouc entre deux feuilles de taffetas.

Le ballon est recouvert sur tout son hémisphère supérieur d'un filet qui s'en détache un peu au-dessous de son équateur : toutes les cordes de ce filet viennent se réunir au-dessous du ballon, comme les génératrices d'un hyperboloïde gauche à une nappe, à un cercle de bois très-dur qui sert lui-même à la

suspension de la nacelle. Grâce à cette disposition, la charge se trouve uniformément répartie sur toute la surface du ballon qu'enveloppe le filet, et il en résulte, pour la nacelle et pour les voyageurs qu'elle doit porter, une stabilité d'ailleurs indispensable.

Pour gonfler une montgolfière, il s'agit simplement de placer un réchaud au-dessous de l'ouverture de l'enveloppe et d'y brûler des matières combustibles : l'air échauffé s'engouffre dans l'enveloppe, et peu à peu sa force élastique tend les parois et leur fait prendre la forme sphéroïdale. Quand Montgolfier fit ses premières expériences, il crut que l'électricité jouait un rôle dans le phénomène de l'ascension, tandis que c'était la seule légèreté spécifique de l'air chaud qui, en vertu du principe d'Archimède, en était la véritable cause. Aussi croyait-il favoriser la production du fluide en employant pour combustibles de la paille hachée avec de la laine humide. De Saussure n'eut pas de peine à prouver que le gaz produit n'avait aucune autre vertu que l'air chaud, et que l'électricité n'y était pour rien.

Les aérostats ou ballons gonflés par l'hydrogène, bien que plus coûteux que les montgolfières, leur sont généralement préférés. La nécessité d'emporter des matières combustibles, le danger d'incendie, et, par-dessus tout, l'infériorité de la force ascensionnelle, beaucoup moindre à égalité de volume, sont les motifs de cette préférence [1].

1. Le poids d'un mètre cube, sous la pression de 760 millimètres, est de :

1293 grammes à......	0°
1247 grammes à......	10°
945 grammes à......	50°
278 grammes à......	100°

Ainsi la force ascensionnelle de l'air chaud, de 46 grammes seulement par mètre cube à 10°, de 348 grammes à 50°, monte à 1015 grammes à 100°. A 0° la poussée de l'hydrogène pur est de 1203 grammes; à 10° elle est encore de 1160 grammes. Comme il est très-difficile de maintenir la température de l'air d'une montgolfière à un point aussi élevé, il en résulte que la force ascensionnelle est beaucoup moindre que celle d'un aérostat gonflé par l'hydrogène pur.

Cependant on a déjà perfectionné la construction des montgolfières, en substituant une éponge imbibée d'alcool au combustible encombrant de la paille ou de la laine. Un aéronaute, M. E. Godard, a adapté au foyer une cheminée surmontée d'une toile métallique, qui pare au danger d'incendie. L'emploi de lampes à pétrole permettrait peut-être de régler à volonté, d'activer ou de modérer la température, et, par suite, de monter ou de descendre comme on le voudrait. M. Joseph Silbermann

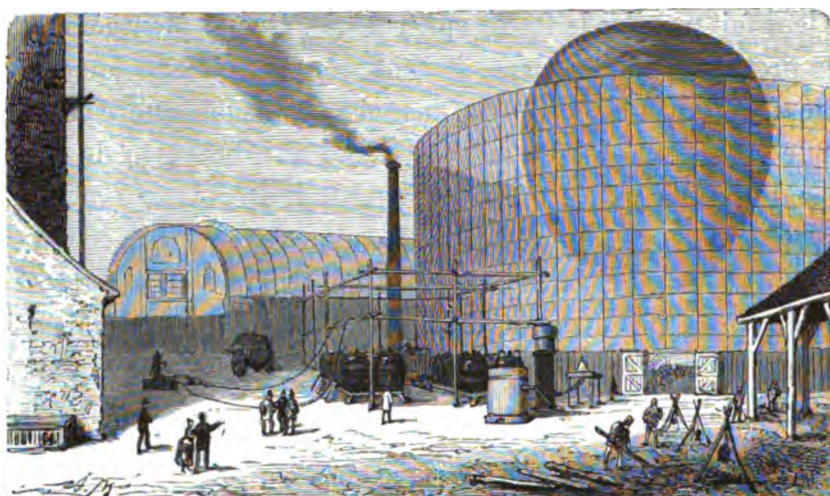


Fig. 55. — Opération du gonflement d'un aérostat au gaz hydrogène.

a fait, sur ce sujet, des recherches intéressantes : son système de montgolfière mériterait certainement d'être expérimenté.

Le gonflement des aérostats par le gaz hydrogène pur se fait de la façon suivante : Le gaz est produit par la réaction de l'acide sulfurique sur l'eau, le fer ou le zinc [1]. Un système de tonneaux renfermant ces substances est disposé de manière que le gaz est recueilli à mesure qu'il se forme, au-dessus d'une cloche

1. Le ballon qui servit, en 1850, à MM. Barral et Bixio avait été gonflé d'hydrogène pur produit par la réaction de l'acide chlorhydrique sur l'eau et le fer. Le lavage du gaz est important, afin qu'il ne conserve pas d'acide de nature à compromettre la solidité de l'enveloppe.

renversée dans une cuve d'eau, analogue aux gazomètres. De là, après avoir été purifié par son passage à travers l'eau, le gaz est introduit par un tube dans l'appendice inférieur de l'enveloppe, et peu à peu le ballon se gonfle sous l'action de la force élastique du gaz.

Au lieu d'hydrogène pur, on emploie le plus souvent du gaz d'éclairage, qui est un carbure d'hydrogène. La densité est beaucoup plus grande, il est vrai, puisqu'elle atteint 0,63 de celle de l'air [1] : la force ascensionnelle est donc aussi bien moindre. Mais l'avantage d'obtenir facilement, dans les villes, une quantité de gaz souvent très-considérable en rend l'emploi à tous égards plus avantageux. Un aéronaute anglais, Green, décarburait par un procédé spécial le gaz d'éclairage, afin d'obtenir un gaz plus léger. M. Glaisher recommande, dans le même but, de se servir, pour le gonflement des ballons, du gaz obtenu vers la fin des opérations de distillation. C'est ainsi que, dans son ascension du 30 juin 1862, il obtint un gaz dont la densité était descendue à 0,36 environ, et qui, dès lors, donnait une force ascensionnelle de 830 grammes par mètre cube, les deux tiers environ de celle de l'hydrogène pur.

Disons maintenant sommairement par quels moyens, par quelles manœuvres l'aéronaute s'élève ou descend à volonté. Nous ne voulons point parler ici de la direction des ballons, car tout mouvement dans le sens horizontal dépend uniquement du courant aérien, qui entraîne le ballon avec une vitesse à fort peu de chose près égale à celle de la masse d'air elle-même ; la direction des ballons est entièrement soustraite, jusqu'à présent du moins, à l'intervention de l'aéronaute : cette intervention se borne à monter ou à descendre verticalement, jusqu'à ce qu'il rencontre une couche animée d'un mouvement ayant le sens du chemin qu'il veut suivre.

Si l'aéronaute voyage dans une montgolfière, en activant le

1. A 0° et 760 millimètres de pression, la force ascensionnelle du gaz d'éclairage est de 693 grammes par mètre cube ; elle est encore de 670 grammes à 10°.

feu, et accroissant ainsi la température de l'air renfermé dans l'enveloppe, il diminue sa densité, et, par suite, augmente d'autant la force ascensionnelle de l'appareil. En ralentissant le feu ou le laissant s'éteindre, l'effet se produit en sens inverse, et l'appareil tend à descendre.

Dans les aérostats gonflés par l'hydrogène, les moyens ne sont plus les mêmes. Pour monter, l'aéronaute ne peut augmenter la force ascensionnelle qu'aux dépens de la charge de la nacelle : il faut qu'il jette du lest, lequel consiste, le plus souvent, en sacs

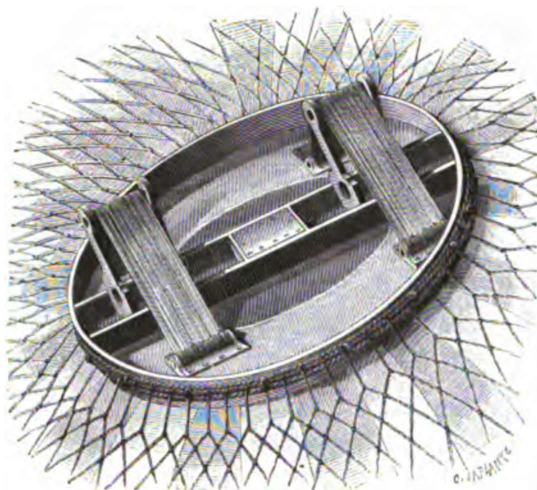


FIG. 56. — Soupape du ballon *l'Entreprenant*.

remplis de sable, qu'un des voyageurs vide au fur et à mesure, sans danger pour les personnes qui pourraient se trouver au-dessous du ballon. Le lest est d'ailleurs une ressource très-limitée, qui s'épuise assez promptement : dans plusieurs ascensions, la nécessité de diminuer la rapidité de la descente ou de la chute a contraint à lancer par-dessus les bords de la nacelle des objets lourds quelconques : vêtements, vivres, instruments.

Pour descendre, on fait sortir du ballon une certaine quantité de gaz. L'enveloppe se dégonfle en partie, le volume du ballon diminue, et la poussée de l'atmosphère devenant moindre, le

globe descend jusqu'à ce qu'il se trouve dans une couche dont la densité plus grande compense la perte de force ascensionnelle.

Pour rendre la sortie du gaz plus facile et plus régulière, le ballon est percé à sa partie supérieure d'une ouverture que ferme

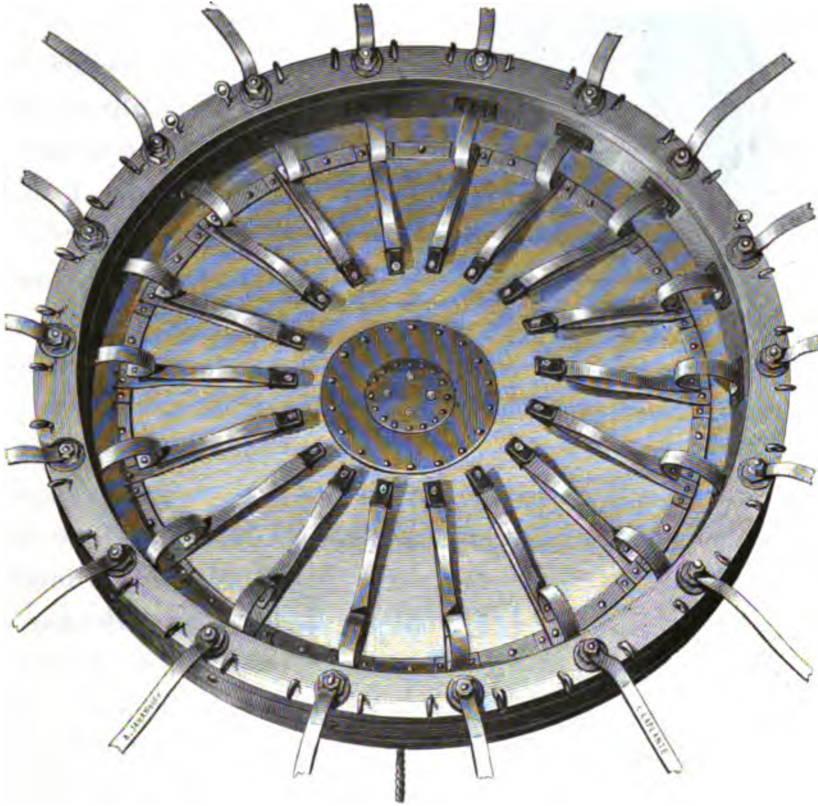


FIG. 57. — Soupape du ballon *le Pôle nord.*

une soupape maintenue par des ressorts. Une corde qui traverse le ballon et qui descend jusqu'à la nacelle, à la portée de l'aéronaute, sert à ouvrir la soupape.

Il importe de modérer la descente, sans quoi la chute, dont la vitesse irait s'accélérant, pourrait devenir dangereuse. « Si l'on descendait d'un seul coup d'une grande hauteur, dit M. Barral, la vitesse que l'on aurait acquise en arrivant à terre serait effrayante, et l'aéronaute pourrait bien être broyé dans la chute.

C'est pourquoi on descend par *cascades*, c'est-à-dire d'abord de 500 mètres ; puis, jetant du lest, on remonte de 100, pour redescendre ensuite de 500, remonter à nouveau, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on arrive à terre, ce qu'un habile aéronaute peut faire avec la plus grande précision et sans accident aucun. »



FIG. 58. — Un ballon muni de son parachute.

Quand la descente est définitive, et que, pour une raison ou pour une autre, son voyage terminé, l'aéronaute veut prendre terre, il emploie une corde (*guide-rope*) munie de nœuds, qui descend au-dessous de la nacelle et dont la longueur est d'une cinquantaine de mètres. A mesure qu'une plus grande quantité de ce lest d'un nouveau genre touche le sol, le poids porté par la nacelle est diminué d'autant, ce qui donne au ballon une tendance à remonter. La rapidité de sa chute se trouve ainsi atténuée. Enfin, une ou deux ancres peuvent servir à accrocher les aspérités du sol, arbres, buissons, rochers, etc., et à arrêter définitivement le ballon dans sa course. L'utilité de ces divers engins et l'efficacité de leur manœuvre dépendent surtout, on le comprendra, de l'habileté et de l'expérience de l'aéronaute.

Peu de temps après l'invention des ballons, on eut l'idée d'employer, en cas d'accident, un appareil spécial connu sous le nom de *parachute*, dont la première idée remonte, du reste, beaucoup plus haut. C'est une sorte de dôme formé de fuseaux

d'étoffe cousus ensemble, qui se ploie et se développe à peu près comme un parapluie. Suspendu, soit à la partie inférieure du ballon, soit à un point de son équateur, il est rattaché à la nacelle par un système de cordes disposées de façon à porter celle-ci avec sa charge dès que l'on vient à couper la corde par laquelle il est suspendu. Le parachute commence par être précipité avec une vitesse croissante, mais la résistance de l'air fait déployer de plus en plus complétement sa surface, et le système tout entier peut ainsi descendre doucement jusqu'au sol. On s'est fort peu servi du parachute. L'aéronaute Garnerin est le premier (1802) qui ait osé se confier à un appareil de ce genre : il descendit d'une hauteur de 1000 mètres; mais, comme on n'avait pas songé encore à ménager, au sommet du parachute, l'ouverture qui permet l'écoulement de l'air, il éprouva des secousses assez brusques dues aux masses d'air qui s'échappaient latéralement, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. A moins de très-graves accidents, de déchirures considérables dans le ballon, les aéronautes s'accordent à regarder les manœuvres de descente de l'aérostat lui-même comme aussi sûres que celles du parachute, qui, dans la grande majorité des ascensions, ne serait qu'un embarras et un poids inutile.

§ III — Applications de l'aérostation a l'art militaire, aux études de météorologie et de physique du globe

Il nous reste à indiquer rapidement les services que peut rendre l'aérostation et ceux qu'elle a rendus déjà. Dès 1794, le Comité de salut public décida la formation de compagnies d'aéronautes ou *aérostiers*, ayant pour fonctions d'observer, à l'aide de ballons captifs, les mouvements et les dispositions des armées ennemies. C'est à la bataille de Fleurus qu'on tira, pour la première fois, parti de ce nouveau genre d'éclaireurs; en 1815, Carnot s'en servit à la défense d'Anvers ; enfin, dans la grande

guerre de la sécession, l'aérostation militaire fut remise en honneur par le gouvernement des États-Unis. Un système de télégraphie électrique faisait communiquer l'armée fédérale avec l'aéronaute.

Pendant la dernière guerre, celle où le second empire a si malheureusement précipité la France, les ballons ont joué un certain rôle; mais ils n'ont pas été, à proprement parler, employés pour les opérations militaires. Paris, investi et privé de toute communication directe avec le reste de la France, a pu envoyer ses dépêches, ses correspondances et un certain nombre d'hommes chargés de missions militaires ou politiques, à l'aide de ballons qu'on lançait quand le vent favorable soufflait vers les points non occupés par les armées ennemies.

Cinquante-quatre ballons, chargés de 2 500 000 lettres, ont été expédiés ainsi par le Gouvernement de la défense nationale, et sont allés porter hors de Paris des nouvelles de la grande ville assiégée et l'assurance de l'héroïque résolution qu'elle avait formée de résister jusqu'à la dernière extrémité. Malheureusement, le retour de ces messagers aériens ne pouvait s'effectuer, la route suivie par eux étant laissée au gré du vent. Au départ, les directions divergentes des ballons avaient trois chances contre une d'aboutir en pays ami, et, par le fait, le plus grand nombre réussit : quelques ballons seulement sont tombés dans les lignes prussiennes; l'un d'eux, *la Ville d'Orléans*, est allé atterrir jusqu'en Norvége; deux ou trois, enfin, ont été perdus, probablement en mer. On fit, il est vrai, en province, plusieurs tentatives pour diriger quelques aérostats vers Paris, mais elles ne furent point couronnées par le succès, qu'on ne pouvait guère attendre que d'heureux hasards. Le seul moyen efficace de retour des correspondances fut l'organisation de la *poste aux pigeons voyageurs :* nous aurons plus loin l'occasion d'en dire quelques mots quand nous parlerons de la photographie microscopique.

Quant à la question de la *direction* des ballons, quant au pro-

blème plus général de la navigation aérienne, question et problème tant agités depuis quelque vingt années, nous avons dit plus haut que nous n'avions point à en parler ici ; et cela par la raison toute simple qu'aucune solution véritablement pratique n'avait encore été ni proposée, ni tout au moins expérimentée. Mentionnons toutefois quelques tentatives intéressantes.

Parmi les chercheurs, il en est qui ont abandonné, pour des

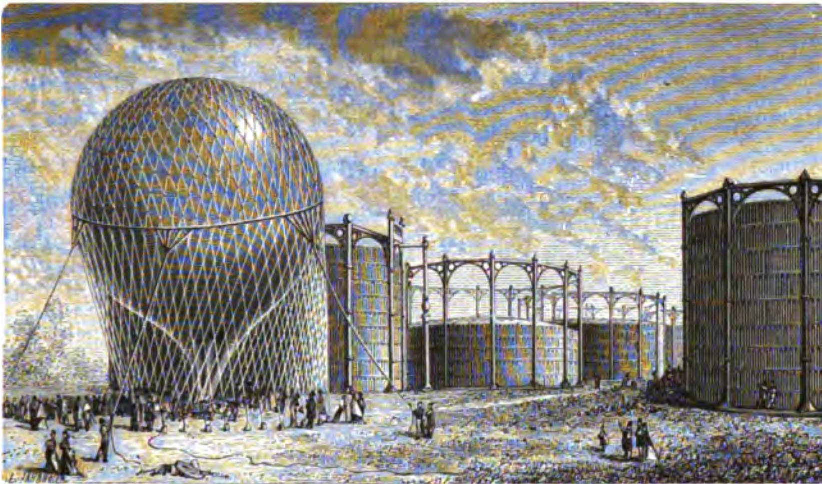


FIG. 59. — Départ d'un ballon à l'usine de la Villette.

raisons qui paraissent plausibles, l'idée de diriger à volonté des appareils sur lesquels les courants aériens ont tant de prise. Outre la difficulté de charger la nacelle d'un ballon du poids d'un moteur assez puissant pour mouvoir un mécanisme quelconque à palettes ou à hélice, il y a le danger de l'explosion, si ce moteur est muni d'un générateur de vapeur, et par conséquent d'un foyer : l'hydrogène est à ce point de vue un gaz trop dangereux.

Prenant alors leur modèle dans l'appareil ascenso-moteur des oiseaux, ces chercheurs ont tourné leurs efforts vers la découverte de moyens d'élever et de mouvoir des appareils plus

lourds que l'air, de façon à réduire ainsi la résistance qu'opposent les courants aériens à une grande surface, et du même coup à éviter tout danger d'explosion et d'incendie. Théoriquement parlant, le problème est possible : la difficulté est dans la réalisation pratique.

D'un autre côté, au lieu de chercher la solution complète de la direction des ballons, quelques savants, parmi lesquels il faut citer en première ligne un ingénieur français, M. Giffard, se sont attachés seulement à obtenir un effet sensible de déviation de la ligne du vent. Cet effet obtenu, il suffit de louvoyer, comme font les navigateurs, pour faire parcourir au ballon un chemin qui se rapproche de la direction voulue. Quelques essais dans ce sens, qui n'ont pas donné de résultats satisfaisants, ont été faits par M. Giffard.

Ils ont été repris vingt ans plus tard, en janvier 1872, par M. Dupuy de Lôme, qui a construit un aérostat dont la forme, les dispositions, le mécanisme, ont été calculés pour le but restreint que nous venons de définir.

Le ballon de M. Dupuy de Lôme a une forme ovale ou oblongue, offrant dans le sens du mouvement un axe de moindre résistance. La force propulsive est obtenue par le mouvement d'une hélice à deux ou à quatre branches, à ailes de taffetas, que manœuvrent, à l'aide d'un treuil à manivelle, un certain nombre d'hommes qui se relayent alternativement. Le ballon est gonflé avec du gaz ordinaire d'éclairage. Il porte intérieurement un petit ballon d'un volume égal au dixième du volume du grand ballon, et qu'on peut remplir d'air au moyen d'un ventilateur porté et manœuvré dans la nacelle. Le rôle de ce ballonnet est de conserver au grand ballon une forme permanente, quelles que soient les variations de pression atmosphérique : il permet ainsi de descendre d'une hauteur de 866 mètres, quand les dimensions sont celles de l'appareil exécuté par l'inventeur, c'est-à-dire avec un volume total de 3454 mètres cubes pour le grand ballon, de $345^{m},4$, par conséquent, pour le ballonnet intérieur. Un gouvernail, formé par une voile

triangulaire placée sous le ballon, à l'arrière, sert à diriger l'appareil dans une direction voulue et à changer cette direction à volonté.

Une expérience a été faite le 2 février 1872. Elle a donné des résultats qui paraissent satisfaisants, en ce sens que l'aérostat, malgré un vent assez fort, a reçu de l'hélice une vitesse propre d'environ 10 kilomètres et quart par heure. Avec cette vitesse, le ballon pouvait dévier, quand l'hélice était mise en mouvement, de 10° à 12° de la route suivie quand l'hélice était stoppée, c'est-à-dire quand le ballon marchait sous la seule influence du vent.

Ces résultats, pour n'être point aussi brillants que ceux qui ont été annoncés par maints inventeurs de la direction des aérostats, constituent un progrès réel, sérieux, qui ne peut manquer de servir de point de départ à des perfectionnements ultérieurs. C'est probablement tout ce qu'il est permis d'espérer raisonnablement dans l'état actuel des connaissances physiques et mécaniques. La substitution d'un moteur puissant, tel que la machine à vapeur, à la force musculaire de l'homme, est le *desideratum* principal du problème de la navigation aérienne par ballons gonflés à l'hydrogène. Toute la question serait de se mettre à l'abri du danger d'inflammation du gaz.

Un mot maintenant de l'application de l'aérostation aux études de météorologie.

Les ballons captifs pourraient fournir à cette science des documents d'une haute importance. En plaçant à des hauteurs différentes un certain nombre de ces appareils munis d'instruments enregistreurs, on obtiendrait des données qu'on ne peut avoir que pour un intervalle de temps très-court par les voyages aéronautiques.

Gay-Lussac et Biot, dans une ascension qu'ils firent en commun le 24 août 1804, s'élevèrent à 4000 mètres de hauteur, et firent une série d'expériences sur les oscillations de l'aiguille

aimantée, afin de déterminer les variations de l'intensité magnétique avec l'altitude. Le premier de ces savants fit seul, trois semaines après, une ascension qui le porta à environ 7 kilomètres de hauteur verticale. Il put reconnaître que la composition de l'air atmosphérique à cette altitude est chimiquement la même qu'à la surface du sol.

L'illustre physicien, qui avait constaté à terre, au moment du départ, une température de + 27°,75 centigrades, trouva, à la

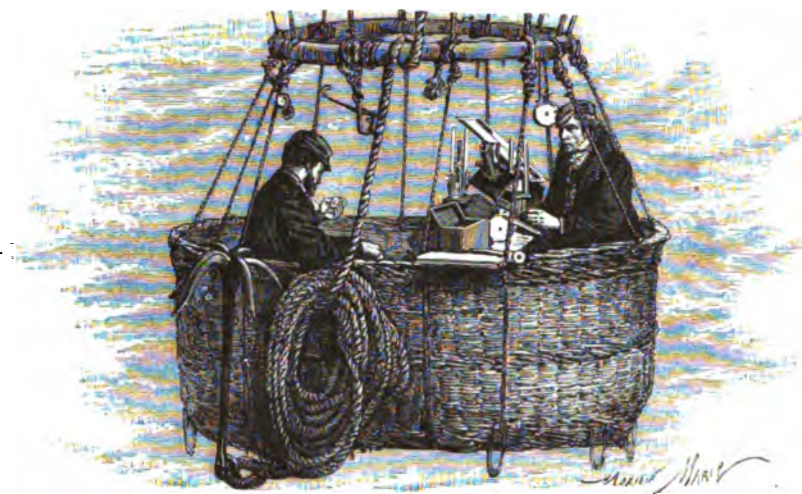


Fig. 60. — Nacelle de M. Glaisher : installation pour une expédition scientifique.

plus grande élévation, une température de — 9°,5 ; plus de 37° de différence.

Parmi les ascensions scientifiques des contemporains, il faut citer celles de MM. Barral et Bixio en 1850, les trente ascensions que l'aéronaute anglais, M. Glaisher, effectua de 1860 à 1865. Au nombre des résultats les plus curieux de la seconde ascension des deux premiers savants, citons ceux-ci : ils reconnurent l'existence, en plein été, de nuages formés tout entier d'aiguilles de glace, nuages qui n'avaient pas moins de 4 kilomètres d'épaisseur ; parvenus à la hauteur de 7049 mètres, MM. Barral et Bixio constatèrent une température de

39° au-dessous de zéro, à peu de chose près celle de la congélation du mercure.

Les voyages de M. Glaisher, ceux que de jeunes et courageux aéronautes français, MM. Fonvielle, Flammarion et Tissandier, firent il y a un ou deux ans, sont décrits avec détail dans un ouvrage intéressant, *les Voyages aériens*, auquel nous renvoyons le lecteur curieux de s'initier aux péripéties de ces sortes d'expéditions.

LIVRE II

ACOUSTIQUE — APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DU SON

CHAPITRE PREMIER

LA TÉLÉPHONIE

---

§ I — Les Signaux acoustiques dans la navigation; Bouées a cloches — Des Tubes acoustiques — La Femme invisible

L'idée d'employer le son, la voix humaine, les cloches, ou d'autres instruments acoustiques, pour correspondre à distance, est fort ancienne. La portée du son est infiniment moindre sans doute que celle de la lumière, et les signaux lumineux ont fourni un moyen de télégraphie longtemps employé avant que l'électricité vînt porter à la perfection, pour ainsi dire, cet art si précieux, cette application si utile.

Mais la lumière ne se voit point ou se voit mal pendant les temps brumeux, ou au milieu des tempêtes : le son est alors un utile auxiliaire qu'on emploie toujours dans la marine, à l'entrée des ports, dans le voisinage des écueils. « Par les temps de brume, les entrées de port, dit M. Renard, sont signalées par

des cloches qu'on sonne à la volée, en observant certains intervalles. Quelques phares possèdent aussi de ces appareils. Aux États-Unis, où les brouillards sont fréquents et très-épais, on n'a pas reculé devant les dépenses qu'exigeait la portée des sons, et l'on a installé sur plusieurs points des cloches pesant jusqu'à 500 kilogrammes et plus, et, sur d'autres, de puissants sifflets alimentés avec de l'air comprimé. » (*Les Phares.*) Dans les passes des chenaux, près des bancs ou des rochers, on voit souvent des bouées munies de cloches qui avertissent les marins du danger.

Les cloches des églises, dans les campagnes et dans les villes, sont des signaux téléphoniques qui avertissent à distance les gens pieux des cérémonies et offices du culte, et ceux-ci savent reconnaître, à l'audition des diverses sonneries, quelle est la nature de la cérémonie annoncée. En cas d'incendie, c'est le tocsin qui fait entendre ses sons sinistres et appelle au loin tout le monde au secours. Mais, dans tous ces cas, c'est le son en plein air qu'on emploie, sans aucun procédé spécial pour le propager à distance en lui conservant son intensité première. Les moyens imaginés pour conduire le son à des distances plus grandes que sa portée ordinaire, voilà qui constitue, à proprement parler, ce que nous appelons la *téléphonie*.

Un de ces moyens, très-employé pour les petites distances, consiste à faire en sorte que le son se propage dans des tubes où la masse d'air limitée qu'on ébranle à une extrémité transmet, presque sans en rien perdre, toute la force vive de l'ébranlement sonore. Les *tubes acoustiques*, ou *speaking tubes* (comme disent les Anglais), sont d'un usage aujourd'hui très-fréquent dans les maisons privées, les ateliers, les usines, les magasins, où les divers employés ont besoin de converser d'une pièce ou d'un étage à une pièce éloignée, à un autre étage. On les emploie dans les navires pour la transmission des ordres aux gabiers des hunes, aux mécaniciens et aux chauffeurs des machines. Ce sont ordinairement des tubes cylindriques et flexibles de caoutchouc, que terminent des orifices d'os, d'ivoire, en forme d'embou-

chures évasées : un sifflet s'emboîte dans cette embouchure. On souffle d'abord dans le tube pour avertir, afin que la personne avertie par le son du sifflet qui est mis en vibration à l'extrémité opposée, place son oreille à l'orifice du tube. Puis celle-ci répond



FIG. 61. — Tube acoustique ou *speaking tube* : embouchure et sifflet.

de la même manière pour indiquer qu'elle est au signal, et la conversation s'échange à voix basse ou moyenne, en ayant soin de placer alternativement la bouche, puis l'oreille, au devant de l'ouverture du cornet.

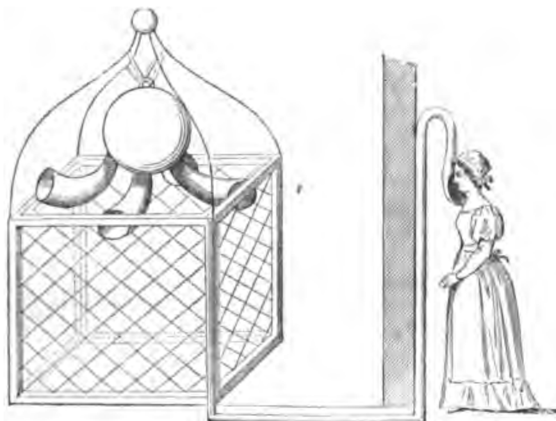


FIG. 62. — La femme invisible.

Les faiseurs de tours, dans les foires, n'ont pas manqué d'utiliser la propriété qu'ont les tubes de transmettre la parole au loin. M. Radau, dans son *Acoustique*, cite plusieurs exemples de ces applications amusantes; en voici une que nous lui empruntons :

« La *femme invisible*, qui excita, au commencement de ce

siècle, une si grande sensation dans les principales villes du continent, s'explique d'une manière très-simple. L'organe le plus apparent de cette machine (fig. 62) était une sphère creuse, munie de quatre appendices en forme de trompettes, et suspendue librement à un support de fil de fer, ou bien au plafond de la chambre, par quatre rubans de soie. Cette sphère était entourée d'une cage de treillis soutenue par quatre piliers, dont l'un était creux et communiquait avec le sol. Le tube acoustique qui le traversait débouchait au milieu de l'une des traverses horizontales supérieures, où il y avait une fente très-étroite, à peine perceptible à l'œil, faisant face à l'orifice de l'une des quatre trompes. La voix semblait alors sortir de la sphère. Il est probable que la personne qui se tenait dans la pièce voisine, et qui donnait les réponses, pouvait voir par une fente dans le mur ce qui se passait dans la salle. Les demandes se faisaient en parlant dans l'orifice de l'une de ces trompes. »

§ II — Le Porte-voix

On transmet aussi la voix humaine à de grandes distances à l'aide d'un instrument fort usité dans la marine, et auquel on donne le nom de *porte-voix*.



Fig. 63. — Porte-voix.

C'est un tube de forme conique, portant à son extrémité la plus étroite une large embouchure évasée, de manière à s'appliquer sur la bouche qu'elle enveloppe extérieurement, de sorte que le mouvement des lèvres peut se faire avec facilité au dedans. A l'extrémité opposée est adapté un pavillon dont on tourne l'ouverture dans la direction du point où il s'agit de transmettre le son.

Kircher, dans son grand ouvrage : *Ars magna lucis et umbræ*, et dans sa *Phonurgia*, fait mention d'une sorte de gigantesque porte-voix, qu'il décrit sous le nom de *cor d'Alexandre le Grand*, dont on se servait dans les armées du conquérant pour rappeler les soldats éloignés jusqu'à une centaine de stades. Ce qui est plus certain, c'est que le porte-voix moderne est d'invention récente : c'est à Samuel Moreland (1670) qu'il paraît dû. C'était une espèce de trompette de verre ou de cuivre.

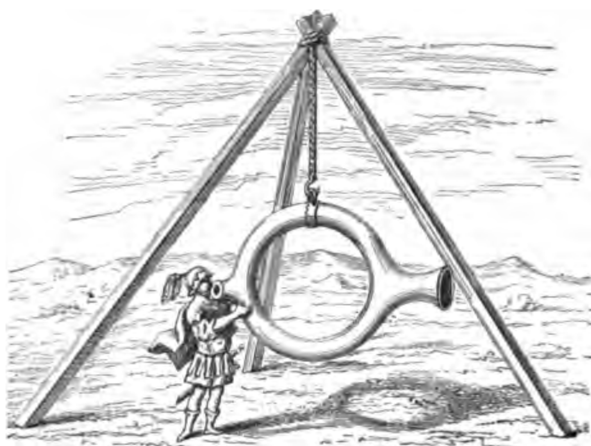


FIG. 64. — Cor d'Alexandre le Grand, d'après Kircher.

Depuis, on a donné toutes les formes, elliptiques, hyperboliques, à ces instruments, et l'on a essayé d'en formuler la théorie en expliquant le renforcement du son par les réflexions successives des ondes sonores sur les parois intérieures du tube. D'après Lambert, la forme conique évasée a pour effet de rendre les rayons réfléchis parallèles à l'axe au sortir du tuyau, de manière qu'ils se dirigent tous vers le point où doit porter le son. Les surfaces qui tournent leurs convexités vers l'axe seraient, dans ce cas, inutiles. Or, Hassenfratz a trouvé, par l'expérience, que de deux porte-voix égaux, l'un muni, l'autre dépourvu de son pavillon, le premier laisse entendre les battements d'une montre placée à l'intérieur à une distance double du second. Ainsi, l'explication est inexacte, ou tout au moins incomplète.

Il est probable que le renforcement du son dans les porte-voix dépend principalement de la forme de la colonne d'air ébranlée à l'intérieur, que les parois elles-mêmes et la réflexion à leur surface ont peu d'influence; ce que confirme encore une autre expérience d'Hassenfratz, qui avait recouvert ces parois



FIG. 65. — Le porte-voix dans la marine marchande.

d'une étoffe de laine, sans affaiblir ni le son ni sa portée. L'influence du pavillon n'est point expliquée.

Les porte-voix en usage dans la marine ont jusqu'à 2 mètres de longueur, avec un pavillon dont le diamètre atteint 30 centimètres. « En Angleterre, dit M. Radau, on en a fait d'une longueur de plus de 7 mètres, qui portèrent la parole à une distance de près de 4 kilomètres; lorsqu'il s'agit seulement de

faire entendre un son inarticulé, un bon porte-voix s'entend jusqu'à 5 ou 6 kilomètres. »

Sur les navires, les contre-maîtres se servent de sifflets pour transmettre les ordres aux matelots. On verra plus loin ce petit instrument d'acoustique dont les usages sont si nombreux, et dont les sons peuvent atteindre une si grande intensité, quand on les fait produire, comme dans les locomotives, par des jets de vapeur.

§ III — Téléphonie musicale pour la transmission des ordres militaires dans l'armée ou dans la marine

L'idée d'employer les sons comme moyens de correspondance militaire est sans doute très-ancienne. On sait que les Gaulois postaient de distance en distance, à portée de la voix, des vedettes chargées de transmettre des ordres ou de communiquer les nouvelles militaires. Mais il n'y avait là aucun système particulier qui assurât le secret des correspondances, comme dans la *téléphonie musicale* de M. Sudre, dont nous allons donner une idée.

Dès 1817, ce savant conçut l'idée de substituer les sons musicaux au langage ordinaire, en combinant diversement un certain nombre des notes de la gamme, et, dix ans plus tard, il proposait l'adoption de son système pour la transmission des ordres dans l'armée. Seulement, au lieu des sept notes de la gamme, il se borna aux cinq notes *ut*, *sol*, *ut*, *mi*, *sol*, c'est-à-dire aux sons donnés par le clairon d'ordonnance. Des expériences furent faites en 1829 au Champ de Mars, en 1841 sur la flotte de la Méditerranée, et en 1850 du Champ de Mars à Rueil; elles furent très-satisfaisantes. M. Sudre avait réduit les sons à trois notes : *sol*, *ut*, *sol*. Plus tard il réussit à n'employer plus qu'un son unique, de sorte qu'une note de clairon, un coup de tambour, un coup de canon, peuvent être à volonté, et selon les circonstances, employés comme éléments de la *téléphonie mili-*

taire. Un système de correspondance de ce genre fut institué à Sébastopol, pendant le siége, et rendit des services à l'armée assiégeante, en prévenant la réserve des attaques nocturnes que les Russes dirigeaient contre les lignes de travailleurs des tranchées.

La téléphonie musicale ne peut rivaliser, sans doute, ni avec la télégraphie électrique, ni avec les signaux visuels. Mais il est des cas où ni l'un ni l'autre de ces systèmes ne peuvent être employés, et où alors elle pourrait être avantageusement adoptée.

§ IV — Les Cornets acoustiques — Le Stéthoscope

Le *cornet acoustique* est un instrument qui a un autre genre d'intérêt, particulièrement apprécié par les personnes atteintes

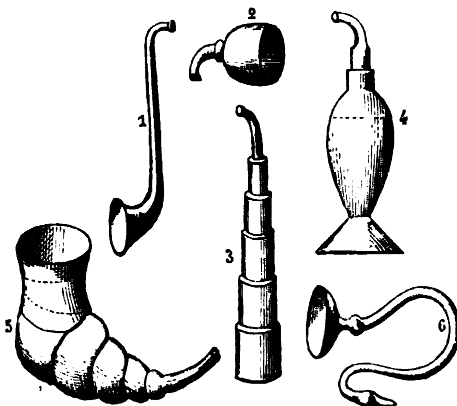


Fig. 66. — Cornets acoustiques.

de surdité partielle. Il renforce les sons comme le porte-voix, mais en les condensant à petite distance et dans l'oreille même de celui qui écoute. Ce n'est plus de la *téléphonie*, ce serait plutôt de la *microphonie*, pour assimiler le rôle de ces appareils utiles aux loupes dont se servent les myopes.

Le cornet acoustique est un tube conique, diversement con-

tourné, que la personne sourde tient à la main en introduisant la plus petite extrémité dans son oreille, et en tournant le pavillon vers la bouche de son interlocuteur. On a attribué l'effet de renforcement du cornet acoustique aux réflexions successives des ondes sonores, qui multiplieraient leur action en arrivant au tympan. Mais, comme dans le porte–voix, on a reconnu par l'expérience que l'influence des parois, et, par suite, de la réflexion à leur surface intérieure, était très–faible, sinon nulle. En réalité, l'effet produit est dû à la diminution progressive des sections ou tranches aériennes qui transmettent le son, et qui, dès lors, le transmettent avec une énergie croissante jusqu'à l'organe. On peut comparer cet effet à celui d'un jet liquide qui sort par l'orifice d'une lance avec une force bien supérieure à celle qui animerait un filet semblable à l'intérieur d'un corps de pompe.

Le *stéthoscope* est une sorte de cornet acoustique inventé par Laennec, et dont se servent les médecins pour étudier les sons des organes intérieurs du corps, de la poitrine, du cœur etc. C'est un cylindre de bois évasé par le bout qu'on applique sur le corps, percé intérieurement d'un canal de quelques millimètres de diamètre, à l'extrémité duquel on applique l'oreille. M. Kœnig a imaginé un nouveau stéthoscope fondé sur la réfraction des ondes sonores. « Il se compose d'une petite capsule hémisphérique, dans laquelle s'enfonce un anneau recouvert de deux membranes de caoutchouc. Une ouverture percée dans l'anneau permet de gonfler par insufflation ces deux membranes, de manière à leur donner la forme d'une lentille. La petite capsule est surmontée, à son sommet, d'un petit tube destiné à recevoir un tuyau de caoutchouc qui doit mettre en communication directe avec l'oreille la masse d'air intérieure. La membrane extérieure, ainsi gonflée, s'applique sur le corps sonore qu'il s'agit d'examiner. Elle se modèle sur la forme de ce corps, en reçoit les vibrations, et les communique à la membrane opposée par l'intermédiaire de l'air emprisonné ; la deuxième membrane les communique ensuite au tympan par

la masse d'air comprise dans la capsule et le tuyau. On peut fixer cinq tubes à la capsule sans nuire à la netteté avec laquelle les bruits arrivent à l'oreille, et alors cinq personnes peuvent étudier simultanément les sons. »

§ V — L'Acoustique appliquée a l'architecture

Une des plus importantes applications qu'on pourrait et qu'on devrait faire des lois de l'acoustique est celle qui aurait pour objet la construction et la disposition des grandes salles d'assemblée publique. Sous ce rapport, on a fait d'assez nombreuses tentatives, mais peu ont réussi, et la raison en est sans doute que les architectes qui les ont essayées étaient plus préoccupés de la question d'art que de la question scientifique; peut-être aussi le manque de connaissances spéciales a-t-il été pour beaucoup dans cet insuccès presque général.

Les salles de réunions publiques peuvent se distinguer en trois catégories, dont les exigences ne sont pas absolument les mêmes au point de vue acoustique. Il y a d'abord les salles de concert, pour lesquelles l'audition claire, distincte, non confuse, est l'objet principal : l'orchestre et les points où se placent les chanteurs forment le foyer sonore, d'où divergent toutes les ondes qui doivent aller frapper l'oreille de l'auditeur, partout où il est placé, dans les conditions les meilleures pour que les plus fines nuances de la mélodie lui soient perceptibles sans qu'il cesse de saisir l'harmonie de l'ensemble. Là, la vue peut être sacrifiée à l'oreille, puisqu'il n'y a pas, à proprement parler, de spectacle, et que tout se réduit à l'audition d'un morceau musical. Le hasard a quelquefois réuni ces conditions, et la salle des concerts du Conservatoire en est un exemple, d'après le témoignage général des amateurs et des artistes.

Les salles des théâtres lyriques forment une catégorie intermédiaire entre les salles de concert et celles où il ne s'agit que d'écouter un orateur ou des acteurs. La musique y est encore

la principale affaire, mais le problème se complique de la nécessité de laisser bien voir la scène à tous les spectateurs. De plus, le foyer sonore y est double, car il consiste, d'une part, dans l'orchestre; de l'autre, dans la scène où les chanteurs se trouvent placés. Les salles de théâtre ordinaire, comique ou dramatique, sont à peu près dans le même cas. Les salles de cours et des assemblées délibérantes forment la troisième espèce de lieux de réunion. Là, la netteté de l'audition est la première et presque la seule difficulté à résoudre, dès que la salle n'est point assez étendue pour que les ondes sonores manquent d'intensité en arrivant à l'auditeur le plus éloigné de la tribune.

En analysant avec soin toutes les causes des défauts que possèdent les salles actuelles, et en tenant compte des lois de la propagation et de la réflexion des ondes sonores, on arriverait sans doute à résoudre les difficultés du problème. La plupart de ces salles pèchent, soit par défaut, soit par excès de sonorité. La forme des murs ou parois de la salle a d'abord une influence prédominante. Souvent la voix et les sons se trouvent absorbés par des masses d'air trop considérables où se perd la force vive des ondes sonores avant qu'elles puissent arriver à l'oreille de l'auditeur. Une trop grande hauteur de plafond, l'étendue trop considérable de la scène et des coulisses, les profondeurs des loges, souvent tendues d'étoffes, de draperies assourdissantes, rendent une salle sourde et à la fois peu favorable à l'émission et à l'audition de la voix des chanteurs ou de l'orateur, comme à celle des sons instrumentaux.

Les salles dont les parois ont une forme d'où résultent des centres différents de convergence des ondes réfléchies, ou sont composées de substances qui renvoient le son avec trop d'éclat, ont un défaut opposé. Elles ont une sonorité exagérée et intempestive, d'ailleurs fort inégale; elles résonnent, et l'auditeur entend à la fois les sons directs et les sons réfléchis, d'où résulte la confusion, s'il s'agit de la parole simple, et la discordance la plus désagréable, s'il s'agit de sons musicaux.

Les règles à suivre pour remédier à ces inconvénients graves

ne peuvent être générales, ou du moins elles seraient susceptibles de modifications selon les circonstances de leur application. En somme, elles se réduisent à une combinaison des lois très-simples de l'acoustique avec les lois de la construction architecturale. Voici ce que dit à cet égard l'auteur d'un opuscule sur *l'acoustique et l'optique des réunions publiques*, qui est en même temps un architecte, M. Th. Lachez. Nous ne citons que ce qui a trait aux trois catégories de salles que nous avons eues en vue :

« *Faire entendre des chants ou des sons musicaux.*

» Que la musique ait lieu dans un espace illimité ou clos de toutes parts, l'auditoire peut très-bien ne rien voir dans l'un et l'autre cas, et percevoir tous les sons sans apercevoir les instruments qui les produisent. Ainsi placer le lieu où se produisent les sons dans l'endroit le plus convenable et dans les circonstances les plus favorables pour que les sons soient rendus plus perceptibles, plus riches, plus harmonieux, tel est le but principal et pour ainsi dire unique qu'on doit se proposer.

» Si l'orchestre est en plein air, l'auditoire doit être groupé circulairement autour de l'orchestre, afin qu'il se trouve sous l'extension simple et naturelle des ondes sonores; l'orchestre étant élevé au-dessus de l'auditoire, afin que le lieu d'ébranlement des ondes se trouve en dehors de la masse d'air occupée par l'auditoire, et que les sons puissent sortir et s'épandre facilement. »

L'auteur fait remarquer qu'un plafond parabolique, des cloisons circulaires ou polygonales ne peuvent être établis avantageusement qu'autant que leur distance au foyer sonore sera assez petite pour qu'il n'y ait pas de résonnance ou de réflexion intempestive. Pour un amphithéâtre clos de toutes parts, les dispositions seraient les mêmes; néanmoins, au lieu de placer l'orchestre au centre, on peut être obligé de le placer à l'un des côtés, les chanteurs devant faire face à toutes les parties de l'auditoire.

Quant aux parois limitant l'espace, elles doivent offrir des

plans droits, bien dressés, de nature résistante et polie; il faut éviter les grandes saillies, les renfoncements ou ressauts d'ornementation; les draperies ne doivent être employées que pour amortir l'excès de sonorité de la salle.

« *Faire entendre seulement la parole d'un orateur.*

» Il y a, dans ce cas, sinon nécessité, du moins utilité très-grande, à renfermer l'auditoire et l'orateur dans un espace limité par des parois; et, suivant que cet espace sera plus ou moins étendu, la parole sera plus ou moins perceptible à un certain nombre de personnes. Un espace clos a non-seulement l'avantage de mettre à l'abri de tout bruit, de tout son étranger et des intempéries atmosphériques, mais il doit encore fournir des ressources, soit pour augmenter l'intensité sonore de la voix, soit pour détruire complétement les résonnances qui ont lieu par suite de la répercussion des ondes : les dimensions de l'espace et son volume déterminent les moyens acoustiques à employer. »

La disposition des auditeurs par rapport au foyer sonore est pour beaucoup aussi dans les qualités d'une salle au point de vue acoustique. En général, une série de gradins disposés en arc de cercle par rapport au foyer, orchestre ou tribune, permettant de voir normalement ou du moins de recevoir directement les sons, est ce qu'il y a de préférable, pourvu que la ligne de ces gradins soit doucement inclinée au-dessus du plan horizontal d'où partent les ondes sonores.

Dans les salles de spectacle, où se trouvent à la fois un orchestre et une scène, et où la vue doit être aussi favorisée que l'ouïe, les conditions du problème sont plus complexes. Elles le sont d'ailleurs d'autant plus, que là l'architecte est encore obligé de compter avec les traditions, les habitudes et la routine.

CHAPITRE II

LES INSTRUMENTS DE MUSIQUE — INSTRUMENTS SIMPLES

Ce serait une étude extrêmement curieuse, mais délicate et difficile, que celle des instruments si variés à l'aide desquels les musiciens exécutent les morceaux de leur art, en considérant chacun de ces instruments au point de vue des lois de l'acoustique musicale. Chez tous les peuples et à tous les âges de l'histoire, et jusque chez les plus arriérées des peuplades sauvages, on trouve de semblables instruments, depuis les ébauches les plus grossières jusqu'aux formes savantes des violons modernes, imités des Stradivarius, des Guarnerius ou des Amati [1], jusqu'aux combinaisons compliquées des grandes orgues des cathédrales. La théorie des instruments de musique est encore en certains points bien obscure, et les praticiens les plus habiles, comme les physiciens les plus savants, ont peine à rendre compte des formes que l'expérience a consacrées. Néanmoins il est un certain nombre de principes sur lesquels la construction des instruments de musique est basée, et il est intéressant de voir en quoi ces principes se ratta-

1. Habiles luthiers de Crémone, qui se sont occupés principalement de la fabrication du violon et des instruments à cordes et à archet. Les Amati étaient trois frères, dont l'un fut maître de Stradivarius, qui eut lui-même pour élève Guarnerius.

chent aux lois des vibrations sonores dans les cloches, les cordes, les tuyaux et les membranes.

C'est ce que nous allons essayer de montrer en passant en revue les types des instruments dont les sons se trouvent produits par les divers modes de vibrations, et qui, dès lors, peuvent se ranger en un certain nombre de catégories. Nous examinerons ainsi successivement : 1° les *instruments simples, monotones*, qui ne rendent en général qu'un son, tels que les cloches, les timbres, les triangles, les tambours, etc.; ils sont fondés sur les vibrations des solides de révolution, des plaques ou lames métalliques, ou enfin des membranes; 2° les *instruments à cordes*, dont la famille innombrable peut se subdiviser en trois branches principales ayant pour types le violon, la harpe, le piano; 3° les instruments à vent, qui se divisent aussi, selon le mode de production du son dépendant de l'embouchure, en instruments à embouchures de flûte, à embouchures de cor ou à bocal, à anches battantes ou libres : la flûte, le hautbois, le cor, peuvent servir de *types* à ces trois genres, qui se trouvent résumés tous dans l'orgue, ce magnifique ensemble où toutes les voix instrumentales ont leur expression, et qui à lui seul remplace tout un orchestre.

§ I — Instruments fondés sur les vibrations des lames ou des plaques

Les plaques, les verges métalliques de formes diverses, vibrent quand on les soumet à une friction longitudinale ou transversale, ou à une percussion quelconque en un de leurs points. Il en résulte des sons qu'on emploie quelquefois dans les orchestres.

Le *triangle* est un instrument de ce dernier genre formé d'une verge cylindrique d'acier non trempé, présentant la figure d'un triangle équilatéral ouvert à l'un de ses sommets, quelquefois on y joint des anneaux métalliques enfilés dans la base.

L'exécutant frappe l'un des côtés du triangle en se servant d'une baguette d'acier. Il résulte de cette percussion une série de sons harmoniques dont la coexistence donne à l'instrument sa sonorité, mais qui ne jouent dans les morceaux de musique aucun rôle qui concoure soit à l'harmonie, soit à la mélodie. Ce n'est qu'un effet singulier n'offrant de caractère que dans l'ensemble du morceau, dont il accentue le rhythme.

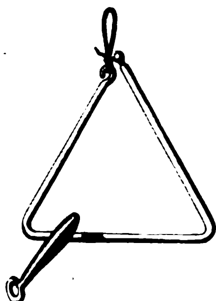


Fig. 67. — Le triangle.

Le *glass-chords*, ou *harmonica à lames de verre*, est un instrument formé d'une série de lames de cristal dont les dimensions sont calculées de manière qu'elles produisent par la percussion les sons successifs de la gamme avec leurs modulations : les lames ayant la même épaisseur, les carrés de leurs longueurs sont en proportion inverse des nombres de vibrations des

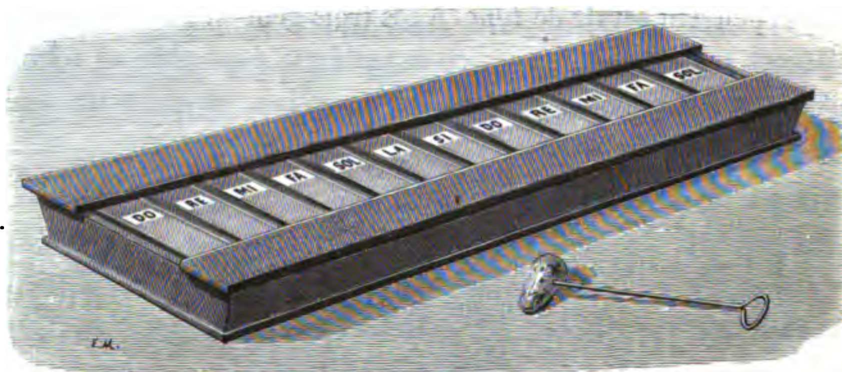


Fig. 68. — L'harmonica à lames de verre, ou glass-chords.

sons de la gamme. Ces lames sont soutenues dans une caisse renforçante de bois par des cordons horizontaux qui s'appuient sur les lignes nodales correspondant au son fondamental de chacune d'elles. On les frappe avec une sorte de marteau dont la tête est de liége ; on peut exécuter ainsi des morceaux assez variés. Les sons ont un timbre cristallin très-pur. Les *claque-bois* des nègres sont des harmonicas dans lesquels le bois remplace le

verre et qui n'ont pas de caisse sonore. Enfin, des lames métalliques disposées de la même manière que dans le glass-chords, et qu'on frappe alternativement ou simultanément avec des marteaux mis en mouvement par un clavier, constituent une sorte de *carillon* qui peut exécuter des airs assez compliqués.

On donne le nom de *boîtes à musique* à des instruments automatiques dont les sons sont produits par les vibrations de petites lames d'acier ou de cuivre disposées comme les dents d'un peigne; les dimensions de ces lames sont calculées de manière à donner les sons de la gamme avec leurs accidents.



Fig. 69. — Une boîte à musique.

Les dents sont ébranlées par de petites chevilles fixées au contour d'un cylindre, qu'un mouvement d'horlogerie fait mouvoir d'une façon uniforme. La boîte dans laquelle ce mécanisme est renfermé donne aux notes émises par ces lames plus de force et de sonorité. L'instrument posé sur une table, sa sonorité est encore accrue. On remonte le mouvement à l'aide d'une clef, comme une montre ordinaire. Les cylindres sont notés de façon à pouvoir exécuter à volonté plusieurs airs.

Les figures 70, 71 et 72 représentent des instruments anciens connus sous le nom de *cistres* et usités dans l'antique Égypte. Ils étaient évidemment fondés sur les vibrations des lames et des verges métalliques. La *guimbarde*, dont s'amusent encore les enfants de nos campagnes, et qui remonte probablement à une très-haute antiquité, est un instrument qu'on pourrait

ranger parmi les cistres. Elle est composée d'une verge d'acier libre par un bout et soudée par l'autre à un arc doublement recourbé qui se met entre les dents. Faisant vibrer alors la verge médiane avec la main, on ouvre ou l'on ferme la bouche,

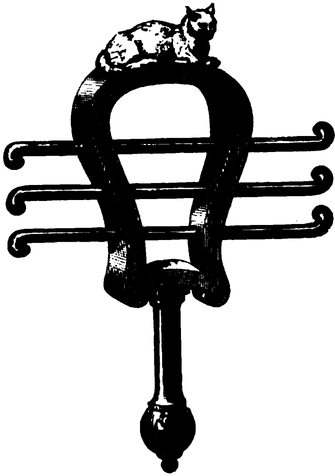


Fig. 70. — Cistre d'Isis.

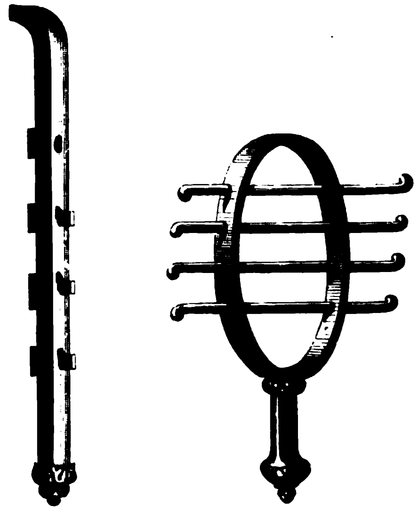


Fig. 71 et 72. — Cistres des anciens Égyptiens.

de manière à modifier et renforcer les sons qui s'échappent du petit instrument.

Les *cymbales* sont employées dans nos orchestres comme le

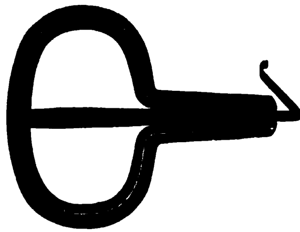


Fig. 73. — La guimbarde.

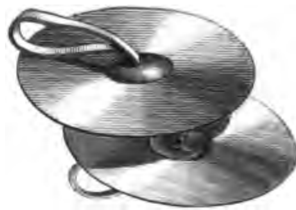


Fig. 74. — Cymbales.

triangle. Ce sont deux plaques circulaires de bronze que l'exécutant tient en chaque main à l'aide de cordons, et qu'il frappe l'une contre l'autre en leur imprimant un mouvement de glissement. Au centre de chaque cymbale se trouve une cavité de forme hémisphérique qui joue un rôle dans la production du son; il en résulte un son plus aigu que ceux donnés par les

plaques métalliques. C'est ce dont on peut s'assurer en bouchant les deux cavités à l'aide de morceaux de papier : le son aigu ne s'entend plus dans ce cas.

Les sons des cymbales ont une certaine analogie avec ceux d'un instrument chinois qu'on nomme *gong*, *gonggong* ou *tam-*



FIG. 75. — Bonzes japonais frappant le gong en jouant des cymbales.

tam. Ce n'est autre chose qu'un disque de bronze d'un assez grand diamètre (depuis 50 centimètres jusqu'à 1 mètre) et entouré d'un bord saillant. On le frappe sur les points voisins de la circonférence à l'aide d'une baguette dont l'extrémité est un tampon recouvert de peau. Les coups répétés du marteau produisent un son extrêmement complexe, d'une sonorité singulière, et qui éclate de temps à autre comme par explosion

en sons tantôt aigus, tantôt graves. L'impression causée par ce bizarre instrument est des plus étranges. Les Chinois l'emploient dans les mariages, les enterrements, les fêtes publiques ou religieuses, les visites des mandarins d'un grade élevé.

Les Chinois distinguent les *gongs*, suivant l'intensité de leurs sons, qui dépend surtout du martelage [1], en gongs mâles et gongs femelles. Les bonzes japonais se servent du gong et des cymbales dans leurs cérémonies. Chladni rapporte que « cet instrument a été employé à Copenhague avec succès pour exprimer, dans un *Oratorio*, le tremblement de terre à la mort de Jésus-Christ ».

§ II — Les Cloches et les Carillons

Les plaques vibrantes, au lieu d'affecter la forme plane, rectangulaire ou discoïdale, sont aussi contournées en forme de solides de révolution, hémisphériques, ellipsoïdaux, en forme de cloches ou de vases. On a ainsi les *timbres* et les *cloches* qui reçoivent les destinations les plus variées.

Les timbres et les cloches sont le plus souvent employés pour servir de signaux, soit dans la vie domestique, soit dans l'industrie, dans les usines, les chemins de fer, sur les navires, etc. On en fabrique de toutes les dimensions, et les sons qu'ils rendent sont en général un composé des sons harmoniques produits par les parties du corps sonore divisées par les lignes nodales. Le son le plus grave, ou fondamental, est celui qui frappe le plus l'oreille, et le mélange des sons plus aigus donne à la cloche le timbre qui lui est particulier et dont l'oreille, bien qu'elle ne puisse le définir, conserve aisément la mémoire.

Les cloches des églises ont, de temps immémorial, une forme pour ainsi dire traditionnelle, dont les figures 76 et 77 repré-

1. Voyez les détails relatifs à la fabrication des tamtams dans les *Industries anciennes et modernes de l'empire chinois*, de MM. Stanislas Julien et Champion.

sentent la coupe et l'ensemble. La cloche japonaise dont la figure 78 donne le dessin a, comme on peut le voir, une forme bien différente de celle des cloches d'églises européennes.

Dans celles-ci, le profil et les épaisseurs du métal aux diverses hauteurs de la cloche sont calculés de façon que le son le plus grave produit par la vibration du bord ou de la *panse* soit l'octave grave du son du *cerveau*. Voici ce que Diderot dit, sur ce sujet, dans l'*Encyclopédie :* « Le diamètre du cerveau, n'étant que la moitié de celui de la cloche, sonnera l'octave au-dessus de celle des bords ou extrémités. Le son d'une cloche n'est pas un son



Fig. 76. — Coupe d'une cloche d'église.



Fig. 77. — Vue extérieure.

simple, c'est un composé des différents sons rendus par les différentes parties de la cloche, entre lesquels les fondamentaux doivent absorber les harmoniques, comme il arrive dans l'orgue; lorsqu'on touche à la fois l'accord parfait *ut mi sol*, on fait résonner *ut*, *mi*, *sol* #, *si*, *sol*, *si*, *ré;* cependant on n'entend que *ut mi sol*. Le rapport de la hauteur de la *cloche* à son diamètre est comme 12 à 15, ou dans le rapport d'un son fondamental à la tierce majeure; d'où l'on conclut que le son de la cloche est composé principalement du son de ses extrémités ou bords, comme fondamental, du son du cerveau qui est à son octave, et de celui de la hauteur qui est à la tierce du fondamental. Mais il est évident que ces dimensions ne sont pas les seules qui donnent des tons plus ou moins graves; il n'y a, sur toute la cloche, aucune cir-

conférence qui ne doive produire un son relatif à son diamètre et à sa distance du sommet de la cloche. »

Du reste, l'illustre encyclopédiste fait ses réserves sur les règles à l'aide desquelles on prétend déterminer le son d'une cloche par sa forme et par son poids : « Il faudrait, dit-il, faire entrer en calcul l'élasticité et la cohésion des parties de la matière dont on les fond, deux éléments sur lesquels on ne peut guère former que des conjectures vagues. » C'est, en définitive, l'expérience ou l'oreille qui prononce avec le plus de certitude.



FIG. 78. — Cloche japonaise de Kioto.

Les physiciens contemporains admettent que, toutes choses égales, les dimensions des masses de formes semblables et de même matière sont en raison inverse des dimensions homo-

logues. C'est sur cette loi qu'on s'est basé pour former, par un assemblage de timbres ou de cloches de dimensions différentes, des séries rendant les sons successifs des gammes et de leurs modulations. La figure 79 représente un instrument ancien de cette sorte qu'on nommait *sonnantes*, et dont les timbres, frappés avec deux baguettes, étaient fixés sur une caisse qui renforçait leurs sons. C'est une sorte d'harmonica à cloches de métal. L'harmonica de Franklin est formé d'une série de cloches de verre ou simplement de verres à pied, mais qu'on met en

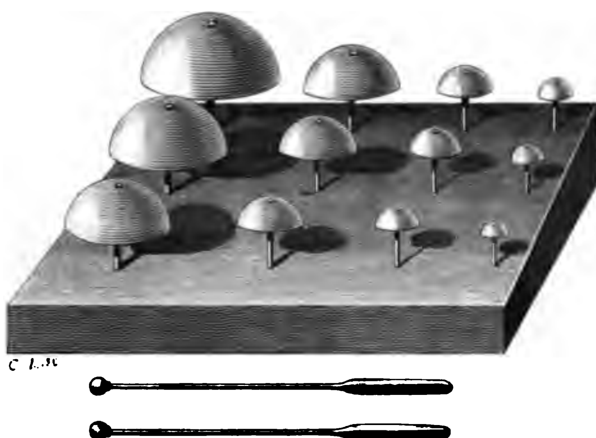


Fig. 79. — Sonnantes.

vibration par le frottement, en se servant pour cela des doigts mouillés qu'on promène sur les bords des vases. En versant plus ou moins d'eau dans chaque verre, on obtient l'accord aussi exactement qu'on veut.

Il est bien entendu que la plupart des instruments de ce genre sont peu usités : ce sont, à vrai dire, des objets de curiosité, intéressants comme applications des lois de l'acoustique musicale.

Les *carillons* des églises ou des beffrois sont des assemblages du même genre que ceux qu'on vient de décrire; ils sont formés de timbres ou de cloches sur lesquels viennent frapper des marteaux mus, soit automatiquement par les chevilles d'un cylindre, soit directement par les touches d'un clavier sur lequel on joue avec les doigts comme sur l'orgue ou le piano, soit enfin,

comme dans les carillons primitifs, à l'aide d'un système de pédales que le carillonneur frappait du poing et du pied. Les carillons à clavier constituent un perfectionnement important sur les deux autres systèmes. Tel est le carillon installé récemment dans la tour Saint-Germain l'Auxerrois, et qui se compose de quarante-deux cloches de diverses dimensions.

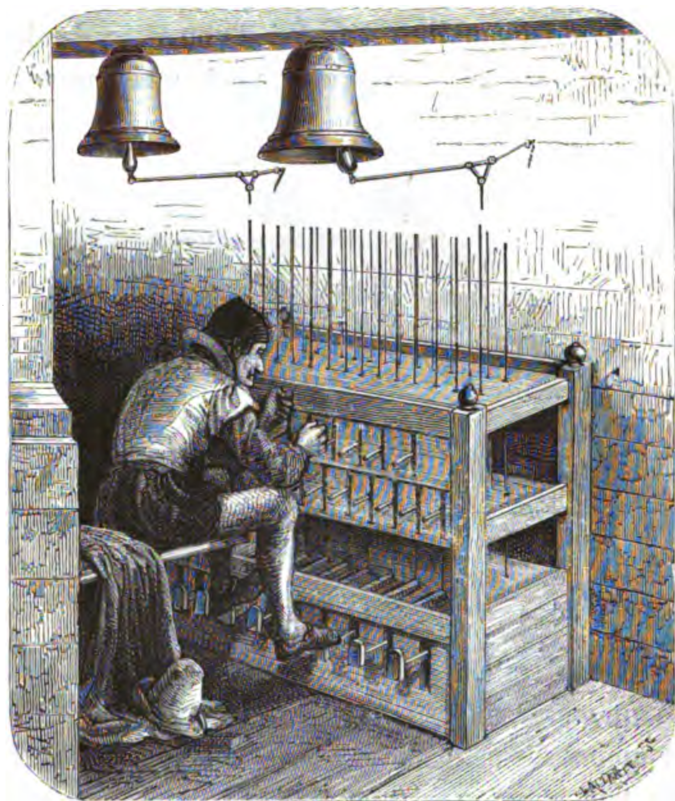


FIG. 80. — Carillon ancien; mécanisme primitif.

Dans les villes du Nord, les sonneries des horloges publiques, aux heures ou aux demies, sont précédées d'un avertissement musical, d'un air d'opéra joué par un carillon dont le mécanisme est automatique. Les fameux carillons de Bruges, de Dunkerque et d'autres villes du Nord sont constitués par un mécanisme analogue à celui des boîtes à musique; mais les cylindres en sont énormes et les dents dont leurs surfaces sont armées soulèvent des marteaux pesants qui frappent sur une série de cloches

accordées suivant les notes de la gamme. Le mouvement est donné aux cylindres par des rouages que les horloges des beffrois détendent à toutes les heures, ou même aux demies et aux quarts. Pour faire mouvoir ces machines énormes, il faut des poids mo–

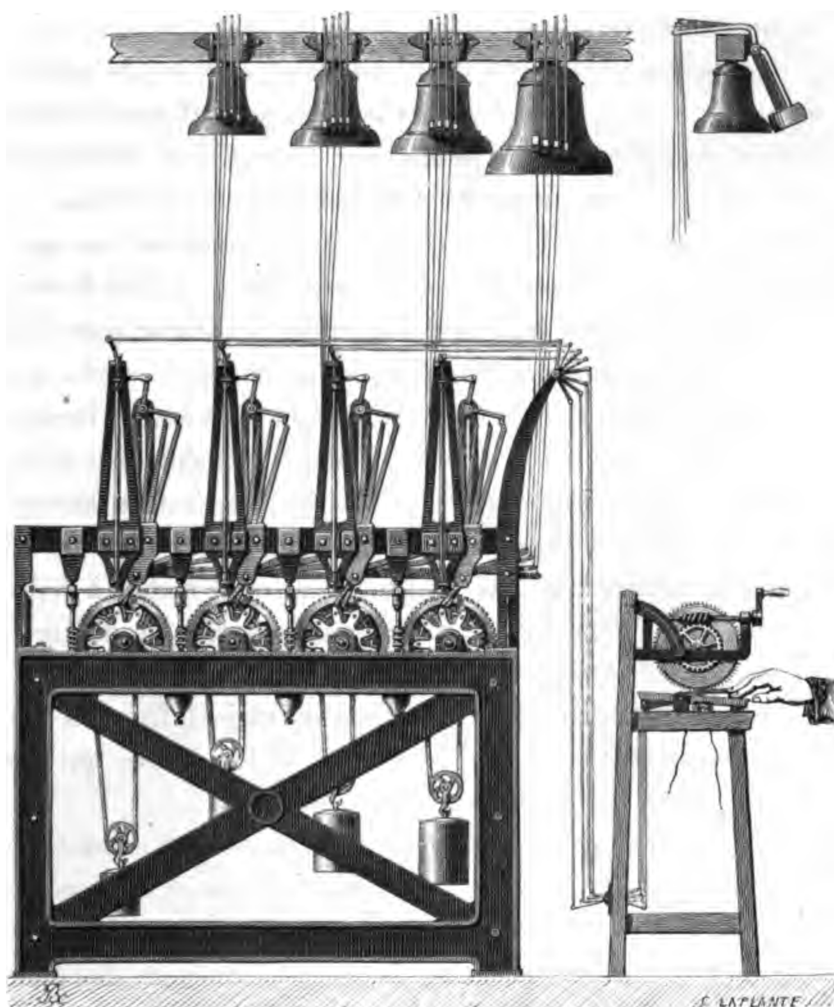


FIG. 81. — Carillon moderne à clavier de Saint-Germain l'Auxerrois.

teurs de plusieurs centaines et même de milliers de kilogrammes portés par des chaînes qui s'enroulent sur des tambours au moyen de treuils. Pour les remonter, il ne faut pas moins de deux ou trois hommes travaillant d'une demi-heure à trois heures.

Mais ce système ancien de carillons, qui était lui-même un

perfectionnement sur le système primitif de la figure 80, a été simplifié beaucoup dans le carillon de Saint-Germain l'Auxerrois que nous venons de citer et dont un spécimen est représenté dans la figure 81. Cette disposition nouvelle est due à M. Collin. En voici la description, d'après M. G. Sire, directeur de l'École d'horlogerie de Besançon :

« Les points principaux de ce nouveau système de carillon consistent : 1° dans l'emploi d'un rouage spécial pour chaque cloche et proportionné à sa pesanteur ; 2° dans le déclanchement de ces rouages, qui ont pour mission de lever les marteaux, au nombre de quatre sur chaque cloche, qui s'engagent l'un après l'autre dans un arrêt où ils restent suspendus, et d'où le doigt ou l'ergot du cylindre n'a pas d'autre effort à vaincre, pour faire sonner, qu'un petit frottement pour les déclancher ; après quoi ils tombent instantanément et répètent la note assez vivement pour pouvoir jouer au besoin des doubles et même des triples croches, ce qui est inutile avec les cloches ; et c'est au moment même où le doigt déclanche le marteau que le rouage est débrayé pour préparer un nouveau marteau et le mettre à la disposition du doigt en cas de répétition de notes. La différence entre les anciens systèmes et celui de M. Collin consiste donc à ne pas faire lever directement le marteau, mais à se servir d'un rouage intermédiaire entre le levier et la touche, ce qui rend l'effort presque nul. »

Il résulte de là qu'on peut employer l'électricité comme moteur ; et, en effet, le carillon de Saint-Germain l'Auxerrois, outre un clavier ordinaire, possède un clavier électrique. « Aussi pourrait-on, dit encore M. Sire, de l'orgue de l'église faire des répétitions de cloches, ce qui serait d'un effet tout nouveau. »

§ III — Les Tambours

Arrivons maintenant aux instruments simples dont les sons se trouvent obtenus par des vibrations de peaux ou de mem-

branes tendues, et sont généralement renforcés par une caisse. On les connaît généralement sous les noms de *tambours* et de *timbales*.

Le plus simple de ces instruments est ce qu'on nomme le *tambour de basque*, formé d'une membrane tendue sur une caisse cylindrique garnie tout autour de grelots ou de lames sonores. On tient l'instrument d'une main, et de l'autre on le frappe avec le dos de la main et en glissant sur la surface le pouce et les doigts. Il en résulte à la fois une vibration rhythmée de la membrane et des sons produits par l'agitation des grelots ou des lames.



Fig. 82. — Tambour de basque.

Le *tambour militaire* est composé d'un corps ou d'une caisse



Fig. 83. — Tambours militaires européens.

de laiton ou de bois, recouverte aux deux extrémités de deux peaux tendues par des cerceaux, qu'on serre plus ou moins à l'aide d'un système de cordes extérieures à la caisse. La peau supérieure, sur laquelle on frappe avec les baguettes, est plus épaisse que la peau inférieure, qui entre en vibration sous l'in-

fluence de la masse d'air cylindrique interne. Deux cordes à boyau sont tendues au-dessous du tambour et appliquées



FIG. 84. — Timbales d'orchestre.



FIG. 85. — Tambours persans.

contre la peau ; en vibrant, elles frappent la membrane et donnent au son un timbre particulier.

On peut construire des tambours dont les sons forment un accord musical à la tierce, à la quinte, à l'octave. Il suffit pour cela de leur donner des dimensions homologues en raison inverse des nombres 1, $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$, 2, c'est-à-dire proportionnelles, par



FIG. 86. — Instruments de musique japonais : le hing-kou.

exemple, aux nombres 30, 24, 20 et 15. C'est, du reste, la loi des vibrations des colonnes d'air renfermées dans les caisses des tambours.

Les *timbales* sont des sortes de tambours dont la membrane est tendue sur une caisse métallique arrondie par le fond ; elles étaient autrefois d'usage dans la cavalerie. Le timbalier portait ce

double tambour de chaque côté derrière le pommeau de la selle de son cheval, et il les frappait à l'aide de baguettes terminées au bout par de petites rosettes, « ce qui leur fait rendre un son plus agréable que si elles étaient frappées d'une baguette de tambour ».

Ces instruments ont été introduits dans nos orchestres, mais on a soin de les accorder à la tierce ou à tout autre intervalle musical, en les construisant de dimensions différentes et en tendant plus ou moins les peaux qui déterminent les vibrations sonores.

Le tambour est un instrument très-ancien et, sous des formes diverses, très-répandu chez toutes les nations civilisées ou barbares. Le *tambourin*, usité dans les fêtes de village de Provence, est un tambour allongé que le joueur bat d'une main, en s'accompagnant d'une petite flûte, le *galoubet*. Une des formes les plus originales du tambour est celle du tambourin japonais que représente la figure 86. C'est le *hing-kou*, dont l'exécutant frappe les membranes avec deux baguettes; l'instrument repose sur un double pied qui empêche les vibrations d'être arrêtées par le sol.

CHAPITRE III

LES INSTRUMENTS A CORDES

---

§ I — Instruments a cordes chez les anciens

Les instruments à cordes sont connus depuis une époque excessivement reculée. David, comme on sait, jouait de la harpe



Fig. 87. — Hazur ou ascior des Hébreux.



Fig. 88. — Nebel.

devant l'arche sacrée des Hébreux, et les sons qu'il en tirait étaient assez mélodieux pour empêcher Saül d'être tourmenté

du démon. Cette harpe était-elle le *hazur*, le *kinnor* ou le *nebel* que représentent les figures 87, 88, 89 et 90?

Toujours est-il qu'il s'agissait d'instruments composés d'une caisse sonore de bois ou de métal, destinée à renforcer les sons des cordes tendues sur une de leurs faces. La harpe dont se servait David devait être un instrument portatif, puisqu'il dansait tout en la faisant résonner et en chantant.

Les *lyres* ou *cithares* des anciens Grecs étaient des instru-



Fig. 89. — Kinnor.



Fig. 90. — Harpe des Hébreux.

ments analogues à ceux des Hébreux. Quatre, cinq, sept, neuf ou un plus grand nombre de cordes tendues, communiquant leurs vibrations aux supports et aux caisses de formes variées qui les accompagnaient, puis aux masses d'air renfermées dans leurs cavités : tels étaient ces instruments, qui servaient principalement à accompagner les voix des rapsodes ou des poëtes. Les cordes étaient pincées avec les doigts ou frappées avec le *plectrum*, baguette d'ivoire ou de bois poli que le joueur tenait de la main droite.

Quel fut l'inventeur de la lyre? Mercure, Apollon, disent les anciens, qui ne croyaient pas devoir donner une trop noble ori-

gine à un art si enchanteur. Orphée n'avait-il pas, en jouant de la lyre, apprivoisé les bêtes farouches, attendri les bois et les



FIG. 91. — Instruments à cordes des anciens : lyre tétracorde et heptacorde.

rochers, gagné Cerbère, et touché jusqu'à l'inexorable Pluton, quand il arracha aux enfers son Eurydice? Mais laissons là

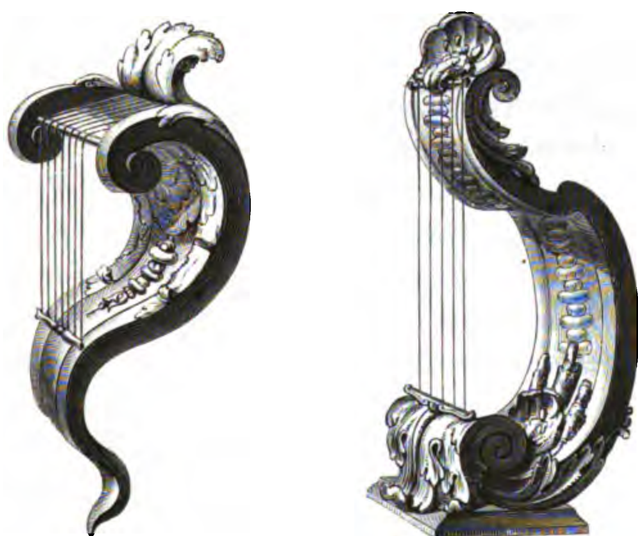


FIG. 92. — Lyres ou cithares des anciens.

la fable, si ingénieuse et si touchante soit-elle, et rappelons seulement que les Grecs étudiaient la lyre, non pas seulement en artistes ou en poëtes, mais en physiciens, car ils connaissaient

les rapports des intervalles sonores et des longueurs des cordes, lois dont la découverte remonte chez eux à Pythagore.

Revenons aux instruments modernes, dont la construction est basée sur les vibrations des cordes sonores, et qui, comme les anciens, sont des instruments composés, puisque les sons des cordes, trop faibles isolément, s'y trouvent renforcés par des caisses dont l'air et les parois entrent simultanément en vibration.

Nous les diviserons en trois classes, selon le mode de mise en vibration des cordes. Dans la première, nous rangerons les instruments *à archet*, dont le type est le *violon*. Dans la seconde, nous placerons les instruments dont les cordes sont pincées, soit par les doigts du joueur, soit par un bout de bois ou de plume : le type de cette série est la *harpe* ou la *guitare* .Enfin, une troisième série sera celle qui comprend les instruments dont les cordes entrent en vibration sous le choc d'un marteau : ce sont les instruments à touches, dont le type est le *piano*.

Il est bien clair qu'une autre classification serait possible, qu'on pourrait distinguer entre les instruments dont les cordes ont des longueurs fixes et ne rendent chacune qu'un son, et ceux dont les cordes peuvent être raccourcies à volonté par l'exécutant, et dès lors sont susceptibles de varier, soit d'une façon limitée, soit indéfiniment, les sons qu'on peut en tirer dans un même morceau. On pourrait ranger aussi les instruments à cordes d'après la nature des substances qui les composent, des timbres que leurs sons offrent à l'oreille, etc. Mais ces divers points de vue ne touchent qu'indirectement au sujet que nous avons à traiter. Ce que nous voulons, c'est montrer sur quels principes de l'acoustique musicale est fondée la construction de chaque type d'instrument.

§ II — Le Violon

Commençons par le plus parfait des instruments de musique, par le *violon*.

Comme dans la plupart des instruments de musique à cordes, il y a à considérer dans le violon, au point de vue de la production des sons, deux parties principales : l'une est formée du système de cordes qui constitue le corps *sonore* initial, celui qui entre directement en vibration sous l'influence de la percussion, du pincement ou du frottement ; l'autre partie se compose d'une caisse creuse sur laquelle s'appuient les cordes, et qui est destinée à renforcer les sons produits et à leur donner les qualités de force, de douceur, de moelleux et le timbre particulier à l'instrument. Les parois de la caisse et la masse d'air qui s'y trouve renfermée contribuent, chacune dans une certaine mesure, à ce résultat. Décrivons ces deux parties en insistant sur le rôle qu'elles jouent.

La caisse sonore d'un violon est formée de deux tables à peu près semblables AB, contournées comme le montrent la figure 93 et échancrées vers leur milieu de façon à laisser un libre passage à l'archet dans ses mouvements à droite ou à gauche. La *table inférieure* est faite d'un bois dur et à grain homogène, ordinairement de hêtre, ainsi que les lames latérales ou *éclisses* qui la réunissent sur tout son contour avec la *table supérieure*. Celle-ci est faite de bois léger, de sapin ou de cèdre, et elle est renforcée à son milieu et au dedans de la caisse par une bande de bois CC sur laquelle s'épaule le manche du violon.

La table de dessus est percée, de chaque côté, à peu près à la hauteur XY de sa partie la plus étroite, de deux ouvertures *oo'* qu'on nomme les *ouïes*. C'est entre les ouïes que se pose le chevalet *e*, petite pièce de bois à deux pieds, évidée de façon à diminuer sa masse, et destinée à servir d'appui aux cordes. Ces dernières sont attachées, d'une part à la *queue d*, pièce qui s'accroche

par une corde et un bouton à la partie la plus basse des éclisses, et percée de quatre trous où l'on fixe les cordes par un nœud ;



FIG. 93. — Le violon : coupes longitudinale et transversale. Le violon vu de face et de côté.

d'autre part, les cordes vont s'appuyer sur le *sillet g*, d'où elles s'engagent dans la gorge creuse du *sommier* DE et s'enroulent sur les chevilles. Entre le sillet et le chevalet, et au-dessous des

cordes, est la *touche f*, pièce convexe d'ébène qui est collée sur le manche et s'avance au-dessus de la caisse sans la toucher. Enfin, entre les deux tables du violon et à peu près au-dessous du pied droit du chevalet, c'est-à-dire du côté de la chanterelle, est une petite pièce de bois cylindrique *a*, qui réunit les tables et qu'on nomme l'*âme*.

Telle est la caisse sonore du violon. Le système des cordes dont nous venons de voir déjà la disposition sur l'instrument, est formé de quatre cordes à boyau d'égales longueurs, mais de grosseurs inégales. La plus grosse, située à gauche, est une corde filée, c'est-à-dire entourée d'un fil de cuivre argenté, qui donne aux sons qu'elle produit un timbre plus mordant et plus métallique. La plus petite se nomme *chanterelle ;* elle est à la droite de la touche ou du chevalet.

En tournant plus ou moins, dans un sens ou dans l'autre, les chevilles autour desquelles s'enroulent les cordes, on leur donne une tension qui fait varier à volonté et graduellement la hauteur du son fondamental, d'après les lois connues des vibrations des cordes sonores. Par ce moyen, on *accorde* l'instrument, c'est-à-dire qu'après avoir pris, avec la seconde corde à gauche, l'unisson du diapason qui sonne le *la* (870 vibrations par seconde), on monte les autres cordes de façon qu'elles donnent les notes suivantes, de quinte en quinte :

4e corde (filée), ou grosse corde. .	*sol*
3e corde	*ré*
2e corde	*la*
1re corde, ou chanterelle.	*mi*

Le violon accordé, on en joue en tenant l'instrument entre le menton et la clavicule gauche et appuyant le manche sur la main gauche, de façon que les doigts puissent s'appliquer normalement sur les cordes à des distances du sillet qui varient selon la hauteur des sons à produire. La main droite tient l'archet, dont elle frotte, en appuyant avec plus

ou moins de force, les cordes voulues, dans une direction toujours parallèle au plan du chevalet, c'est-à-dire perpendiculaire à la longueur même des cordes.

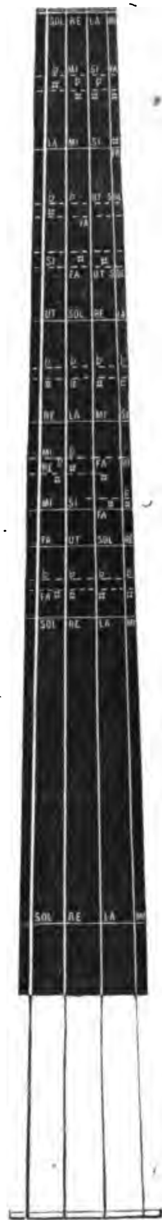


FIG. 94. — Tablature du violon.

Les figures 94 et 95 indiquent les points où doivent porter les doigts sur chaque corde, pour que celles-ci rendent les sons successifs d'une gamme dont le *sol* le plus grave serait la tonique initiale. Il est bien clair qu'au lieu de passer d'une corde à une autre (ce qui se fait sans changer la main de place, sans *démancher*), on pourrait produire les mêmes sons (du moins les sons plus aigus que le son fondamental de chaque corde) sur une corde unique en avançant la main vers le chevalet et en posant les doigts en des points de plus en plus éloignés du sillet. C'est ce que rend évident l'aspect du diagramme où nous avons figuré ces positions jusqu'au milieu même de chaque corde, point qui correspond à l'octave aiguë du son fondamental de chacune d'elles.

Un mot maintenant sur la façon dont vibre l'instrument quand les cordes sont frappées par l'archet. Cette baguette, munie de crins également tendus et frottés de colophane, ébranle la corde comme ferait une suite rapide de chocs plus ou moins légers, qui, selon qu'on tire ou qu'on pousse l'archet, dérangent la corde à droite ou à gauche de sa position d'équilibre et lui impriment, à chaque très-court intervalle où elle est laissée libre, une série d'oscillations dont la rapidité est en rapport avec la longueur de la partie vibrante, avec la tension de la corde et son diamètre. Il résulte de ces sons multiples et isochrones un son unique qui est formé, comme nous le savons, non-seule-

ment de la note principale, mais de toutes ses harmoniques.

Si la corde entrait seule en vibration entre ses points d'appui, qui sont, d'un côté le chevalet, de l'autre le sillet ou le doigt jouant le rôle de sillet, le son serait maigre, sans ampleur et sans éclat. Mais, par l'intermédiaire du chevalet, les vibrations de la corde se transmettent à la table de dessus, et de celle-ci, soit par les éclisses, soit par l'âme, à la table inférieure et à tout l'instrument. Mais la masse d'air contenue entre ces deux tables joue elle-même un rôle important par les vibrations qui lui sont communiquées. Elle agit comme un tuyau renforçant de grande section et de faible profondeur, ce qui explique qu'elle renforce tous les sons émis par l'instrument, bien qu'il y ait toujours, dans la série indéfinie des sons du violon, certains d'entre eux qui sonnent avec plus de force et d'ampleur que les autres.

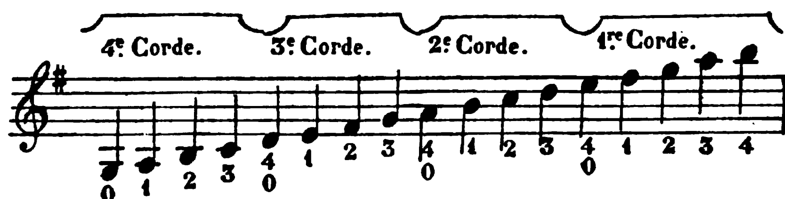


Fig. 95. — Tablature du violon; doigté.

Les ouïes, comme on voit, sont utiles pour transmettre au dehors, à l'air extérieur, les vibrations de la masse d'air enfermée dans la caisse. Sans les ouïes, les sons seraient sourds. Savart, qui a longuement étudié, dans une suite d'expériences célèbres, le mécanisme du violon, a reconnu que cette masse d'air doit être d'ailleurs isolée de tous côtés : en perçant des ouvertures dans les éclisses, le son devenait de plus en plus maigre à mesure que les ouvertures devenaient plus larges, et ainsi les vibrations des tables sont séparément insuffisantes.

Les parois de la caisse sonore du violon et la masse d'air renfermée vibrent ensemble à l'unisson, ainsi que l'a vérifié Savart. Néanmoins, prises séparément, les deux tables doivent donner deux sons différant environ d'une seconde majeure. Plus près de l'unisson, elles donneraient lieu à des battements; plus éloi-

gnées, elles auraient de la peine à s'y mettre ensemble. C'est la table supérieure, du reste, qui vibre avec le plus de force : voilà pourquoi il importe que le bois dont elle est formée soit fibreux, élastique et léger. La table inférieure, représentant le fond d'un tuyau bouché, n'a besoin de vibrer que faiblement, et se fait, pour cette raison, d'un bois plus compacte, moins fibreux et plus lourd.

L'âme d'un violon est une pièce essentielle à la sonorité et aux qualités des sons. Selon Savart, son rôle est de rendre les vibrations de la table normales. « Pour appuyer cette manière de voir, il perça les deux tables et fit vibrer les cordes normalement aux tables, en faisant passer l'archet par les ouvertures ; alors l'âme devint inutile. » M. Daguin, en rappelant ainsi l'opinion de Savart sur l'âme, la trouve inexacte ou incomplète, et les raisons qu'il donne à l'appui de cette critique nous semblent très-justes : « Dans cette explication, dit-il, on ne conçoit pas pourquoi l'âme doit être sous un pied du chevalet et non au milieu. Une seconde colonne sous l'autre pied devrait augmenter l'effet, tandis qu'elle rend le violon sourd. Les éclisses ne devraient-elles pas, d'ailleurs, produire le même effet que l'âme ? Il nous semble, d'après ces considérations, que l'on doit expliquer l'effet de l'âme de la manière qui suit : L'âme a pour effet de donner au pied du chevalet un point d'appui, autour duquel il vibre en battant sur la table de son autre pied. Si l'un des pieds n'était pas appuyé sur un point fixe, il se relèverait pendant que l'autre s'abaisserait, parce que les cordes n'agissent pas normalement à la table, puisque l'archet les ébranle très-obliquement, ce qui entraîne le chevalet dans un mouvement transversal quand il n'a pas de point fixe. »

Là aussi se trouve la raison pour laquelle le chevalet repose par deux pieds sur la table. Il est évidé parce que, si sa masse était plus forte, les cordes ne pourraient lui communiquer que de faibles vibrations, et la sonorité de l'instrument en serait diminuée. C'est précisément ce qu'on fait dans les passages qu'il s'agit de jouer *pianissimo*, et qu'on note alors *con sordini*. La sourdine augmente la masse du chevalet, tout en communiquant

aux sons du violon, plus voilés alors et plus sourds, un timbre particulier, un certain caractère de mélancolie.

Savart, qui a beaucoup étudié les instruments à cordes, a cherché à se rendre compte de l'influence de la forme du violon et de la nature de la substance dont la caisse est construite. Il a construit lui-même un violon trapézoïdal, à tables planes et à contours rectilignes, qui avait d'assez bonnes qualités, au point de vue musical. Mais les violons de verre, de porcelaine, de métal, qu'on a essayés, ne valent rien. Évidemment, la légèreté spécifique des tables, la nature fibreuse du sapin, son élasticité, sont des conditions essentielles pour la régularité et l'ampleur des vibrations. Les luthiers les plus habiles connaissent et appliquent par tradition les règles de l'art : les épaisseurs variables du bois des tables aux différents points de leurs surfaces, la qualité du bois, les proportions relatives de toutes les parties de l'instrument, la monture elle-même, enfin, et surtout, paraît-il, la nature du vernis appliqué à l'extérieur du violon, forment une suite de notions acquises par une longue expérience et des tâtonnements nombreux, dont l'analyse scientifique serait très-délicate et très-difficile.



Fig. 96. — Violon trapézoïdal de Savart.

L'âge des violons, l'usage prolongé entre les mains d'artistes habiles, paraissent jouer un rôle dans leurs qualités : il est possible que l'élasticité des fibres se développe sous l'influence d'un jeu régulier et savant. C'est une opinion que partagent les artistes et à laquelle des physiciens de mérite ont adhéré [1].

1. Voici celle de Helmholtz : « Une bonne partie de la supériorité des vieux violons pourrait bien résider dans leur âge même et dans le long usage, ces deux circonstances ne pouvant que favoriser le développement de l'élasticité du bois. » (*Théorie physiologique de la musique*, traduction de M. Georges Guéroult.)

Mais il ne faut pas oublier non plus que la beauté des sons que peut rendre un instrument de ce genre dépend, en majeure partie, du talent de l'artiste entre les mains duquel il se trouve. Presque toute l'habileté de celui-ci, à ce point de vue, réside dans la façon dont son bras droit ou, pour mieux dire, sa main droite sait manier l'archet, dans la netteté et la force avec lesquelles les doigts de la main gauche appuient sur les cordes. La pureté des sons, leur force, leur moelleux, les mille expressions variées qu'ils sont susceptibles de rendre, toutes ces qualités merveilleuses dépendent sans doute de l'excellence de l'instrument dans une certaine mesure; elles sont, avant tout, dans le talent de l'exécutant : l'expression, le sentiment musical, en se joignant à ces qualités matérielles, constituent son génie.

§ III — Instruments a archet de la famille du violon

Tout ce que nous venons de dire du violon s'applique aux instruments de la même famille, instruments de dimensions variées, mais ayant à peu près la même forme, la même structure extérieure et intérieure, et se jouant, comme le violon, à l'aide d'un archet, parfois en pinçant les cordes dans les endroits musicaux marqués d'un *pizzicato*.

Tels sont : l'*alto*, ou viole, qu'on nommait aussi autrefois *alto-viola*, qui est un violon de dimensions un peu plus fortes, accordé à la quinte au-dessous du violon, avec deux cordes filées et deux cordes simples donnant, comme sons fondamentaux : *ut*, *sol*, *ré*, *la*; le *violoncelle*, beaucoup plus grand que le violon et l'alto, et qui est monté comme ce dernier, mais à l'octave au-dessous; il est tenu entre les jambes de l'exécutant, de sorte que l'archet marche en sens contraire du mouvement de l'archet dans le violon et dans l'alto, les cordes graves étant à droite de l'exécutant au lieu d'être à gauche; enfin, la *contrebasse*, encore plus volumineuse, et dont les cordes à vide sonnent à l'octave grave de celles du violoncelle. Autre-

fois l'alto se jouait en tenant l'instrument appuyé sur les genoux ou sur une table et en tirant et poussant l'archet comme dans le violoncelle. Aujourd'hui, il se tient sous le menton



FIG. 97. — Instruments de la famille du violon : alto, violoncelle ou basse, contre-basse.

comme le violon lui-même, dont le jeu est entièrement semblable.

Nous ne mentionnons ici que les instruments à cordes et à archet usités dans la musique moderne et européenne. Jadis,

les instruments de la famille du violon étaient plus variés, plus nombreux.

On distinguait plusieurs espèces de violes, dont le nombre des cordes était généralement de six; la basse de viole avait

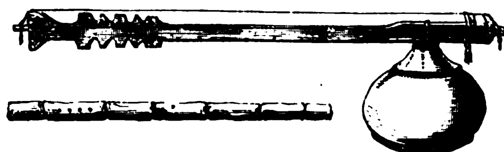


FIG. 98. — Violon des Ouadjiji.

sept cordes, et la *viola de bardone* des Italiens n'avait pas moins de quarante-quatre cordes, mais évidemment toutes ces cordes ne pouvaient être touchées par l'archet. L'alto-viola ou quinte, et la *viola di gamba* ou basse de viole sont les deux types

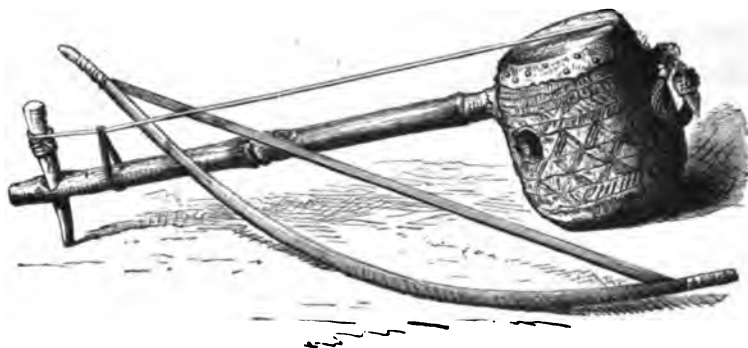


FIG. 99. — Violon africain.

qui ont subsisté sous les noms, seuls usités aujourd'hui, d'*alto* et de *violoncelle*[1].

Il nous a paru intéressant de mettre sous les yeux du lecteur quelques types d'instruments analogues au violon pris chez les

1. Les personnes curieuses de l'histoire des instruments trouveront d'intéressants spécimens des instruments anciens dans le musée du Conservatoire de musique, qui s'enrichit tous les jours sous la savante et zélée direction de son conservateur, M. Chouquet.

nations étrangères. Les violons persans et chinois ne paraissent pas construits avec beaucoup plus d'art que ceux des peuplades sauvages d'Afrique, que les violons des Ouadjiji. Ce sont tous



FIG. 100. — Musiciens persans. Violon et tambour de basque.

de curieux restes, des spécimens de l'enfance de l'art, avec lesquels les Amati, les Stradivarius, les Vuillaume n'ont de commun que les noms.

§ IV — La Guitare — La Harpe

Une autre classe d'instruments à cordes est celle dont la *guitare* et la *harpe* sont les types. Les vibrations sonores n'y sont



Fig. 101. — Instruments de musique chinois à cordes et à archet.

plus produites par le frottement d'un archet, mais par le pincement des doigts, ou par le choc d'un morceau de bois ou de plume; mais, comme les instruments de la famille du violon, les sons des cordes s'y trouvent renforcés par une caisse sonore, par les vibrations des parois de cette caisse, ainsi que de la masse d'air qui s'y trouve renfermée.



PLANCHE VI — MUSICIENNES JAPONAISES

Dans la guitare, l'absence de chevalet contribue, avec la manière de faire vibrer les cordes, à donner aux sons une force, une sonorité de beaucoup inférieure à celle des sons des instruments à archet. Il en résulte aussi un timbre très-différent, qui donne aux morceaux joués sur la guitare une teinte



FIG. 102. — La guitare.



FIG. 103. — Le téorbe.

de légèreté, de douceur à la fois et de mélancolie. Du reste, c'est un instrument plus propre à l'accompagnement du chant qu'à l'exécution des *soli*.

Le nombre des cordes est variable. Chacune d'elles se touche ou se pince, soit à vide, auquel cas elle produit le son fondamental, soit raccourcie par l'imposition des doigts de la main gauche, qui l'appuie sur des sillets disposés à des distances convenables sur la touche. L'exécutant joue donc toujours juste, si

l'instrument est bien accordé, toujours faux, s'il ne l'est pas; et, à ce seul point de vue, on voit de combien la guitare est inférieure au violon. Avec ce dernier instrument, un artiste qui a l'oreille juste corrige, par son doigté, les variations qui se produisent dans la tension des cordes pendant l'exécution d'un morceau. Dans la guitare et dans les instruments où les notes sont déterminées sur les cordes par des sillets fixes, une telle correction est impossible.



FIG. 104. — La mandoline.

Le *luth*, le *téorbe*, la *mandore* et la *mandoline*, sont des instruments, aujourd'hui à peu près passés de mode, de même genre que la guitare, dont ils ne diffèrent que par la grosseur, la forme



FIG. 105. — Japonaise jouant du gotto.

de la caisse sonore, le nombre des cordes, la façon dont celles-ci sont accordées. Ils sont peu ou point usités dans les



PLANCHE VII — LA HARPE

orchestres; mais les chanteurs des pays méridionaux font un fréquent usage de la guitare et de la mandoline [1].

La *harpe*, dont nous avons constaté plus haut l'ancienneté, est un instrument à cordes qu'on met en vibration par le pincement des doigts. Sa forme diffère entièrement du violon, de la guitare ou des instruments analogues à ces deux types. Bien qu'elle soit peu usitée aujourd'hui, elle mérite une description spéciale.

Sa construction était jadis fort simple; mais elle a été grandement perfectionnée dans les temps modernes. La harpe se compose aujourd'hui de trois parties, dont chacune correspond aux trois côtés inégaux d'un triangle, comme le montre la planche VII. La caisse, ou corps sonore, est un assemblage de huit pans de bois assemblés et collés, sur lesquels est posée une table de sapin percée d'un certain nombre d'ouïes en forme de rosaces ou de trèfles. C'est sur cette table qu'on fixe les cordes à l'aide d'autant de petits boutons : par leur autre extrémité, les cordes sont fixées à la *console* ou au *clavier*, de forme plus ou moins contournée, qui constitue le côté supérieur du triangle. Là les cordes sont enroulées à autant de chevilles qui permettent de leur donner la tension convenable ou d'accorder l'instrument.

Dans la partie inférieure de la caisse, ou du pied de la harpe, aboutissent des tringles logées dans le troisième côté du triangle. Chaque tringle correspond, dans le pied, à une pédale sur laquelle le joueur appuie quand il est nécessaire. Par son autre extrémité, la tringle est reliée à des leviers qui agissent, quand elle est relevée, sur des crochets extérieurs; ceux-ci appuient alors toutes les cordes qui sonnent à l'octave les unes des autres contre des sillets qui les raccourcissent ainsi dans la proportion

1. « On ne peut guère déterminer l'origine de la guitare. Nous tenons cet instrument des Espagnols, chez qui les Maures l'ont vraisemblablement apporté : c'est l'opinion commune en Espagne qu'il est aussi ancien que la harpe. » (*Encyclopédie* de Diderot et Dalembert.)

voulue par les lois des vibrations sonores, pour que chaque note se trouve diésée dans toute l'étendue de l'instrument. Le mécanisme en est aisé à saisir à l'aide de la figure 106.

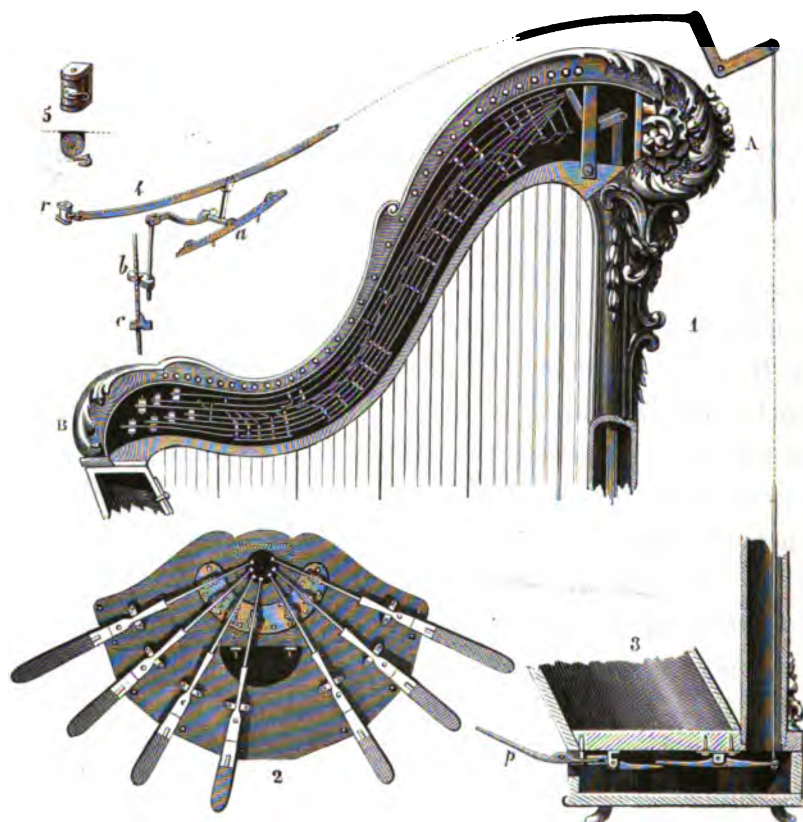


Fig. 106. — Mécanisme de la harpe. Console et pédale.

AB. Coupe de la console, leviers des pédales, tirants et ressorts. — 2. Les pédales. — 3. Mécanisme d'une pédale *p*; tringle. — 4. *a*, arbre pivotant sous l'action du tirant, faisant mouvoir le sabot *b* du crochet et l'appuyant sur le sillet *c*. — 5. Ressort servant à ramener les tirants à leur position quand l'action de la pédale cesse.

Il y a naturellement sept pédales dans la harpe : trois du côté du pied gauche, servant à *diéser* les notes *si*, *ut*, *ré*, et quatre du côté du pied droit, pour diéser les notes *mi*, *fa*, *sol*, *la*[1].

Le joueur de harpe tient l'instrument entre les jambes, le

1. Quand on joue sans pédale, le ton est celui de *fa* avec un bémol à la clef. La pédale de *si*, haussant tous les *si* ♭ d'une seconde mineure, les rend *naturels*, et l'on est alors dans le ton d'*ut naturel majeur*.

corps sonore appuyé à son extrémité supérieure sur l'épaule droite, les cordes et les tringles ayant ainsi une position verticale. Il pince les cordes des deux mains, la droite étant plus particulièrement réservée aux notes supérieures, c'est-à-dire



FIG. 107. — Harpe galloise ou telyn.

aux cordes les plus courtes, la main gauche pinçant les plus grandes cordes, c'est-à-dire les basses. L'étendue de la harpe était ordinairement de 4 octaves et demie à 5 octaves, données par trente-deux ou trente-cinq cordes, depuis le *si* des cordes graves (correspondant au premier *si* de la contre-basse) jusqu'au *la*, qui est à l'unisson du *la* (à vide) du violon. Mais

aujourd'hui les harpes ont jusqu'à quarante-deux et même quarante-six cordes, ayant, comme on voit, une étendue aussi grande que celle des pianos à six octaves. La beauté, la pureté, l'éclat des sons de cet instrument, font regretter que la vogue l'ait abandonné. On ne voit plus guère la harpe qu'aux mains des musiciens ambulants, et les harpistes de talent sont aujourd'hui fort rares.

De même que la mandoline ou la guitare sont les instruments préférés des peuples méridionaux, de l'Italie ou de l'Espagne,



FIG. 108. — Harpe birmane.

la harpe est l'instrument national des pays du Nord, et surtout de l'Irlande. « Les Gallois ont un instrument national qu'on appelle la *telyn*. C'est une harpe qui offre la particularité d'un triple rang de cordes..... La rangée du milieu correspond aux touches noires du piano (dièses et bémols). On joue de la *telyn* sur l'épaule gauche et de la main gauche. » (*Voyage dans le pays de Galles*, par M. A. Erny.) On voit, par ce passage, que la harpe galloise est d'une construction beaucoup plus simple que la harpe décrite plus haut, la rangée de cordes du milieu rendant inutile le mécanisme des pédales, des tringles et des leviers de la console; mais aussi le plus grand nombre des cordes en rend le doigté plus compliqué.

§ V — Le Piano

Des instruments à cordes, où les vibrations sont déterminées par le frottement de l'archet ou par le pincement des doigts, nous passons à ceux dont les cordes sont frappées par des marteaux que mettent en mouvement des *touches*. Tel est le *piano*, aujourd'hui si répandu, et qui, pour les femmes surtout, reste

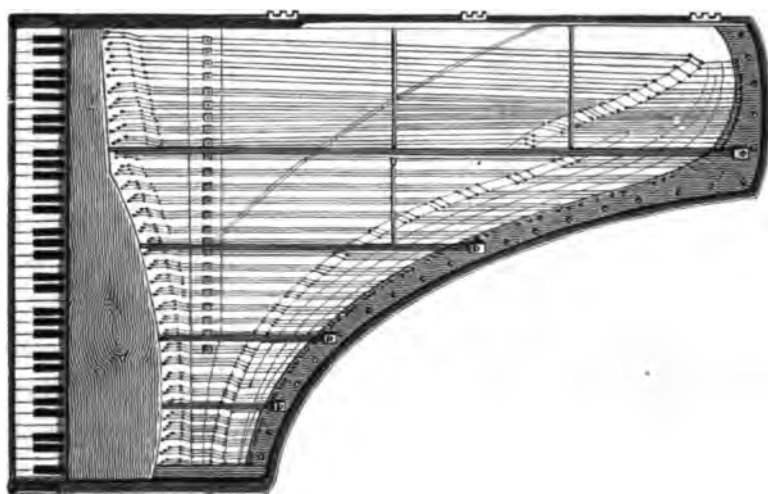


Fig. 109. — Le piano : caisse sonore; table d'harmonie et cordes.

l'instrument par excellence, étant moins fatigant que la harpe et plus fécond en ressources musicales, mais non supérieur à celle-ci pour la beauté des sons.

Il y a trois parties principales à considérer dans le piano : la caisse sonore, les cordes et le mécanisme des touches et des marteaux.

La caisse varie de forme, selon la disposition générale de l'instrument et du clavier, qui peut être horizontale ou verticale, et, dans le premier cas, longitudinale ou transversale. Cette disposition n'ayant rien d'essentiel, nous nous bornerons à celle qui est préférée des artistes par le développement le plus favorable à la sonorité, et nous décrirons ce qu'on nomme le

piano à queue, dont la caisse a la forme d'un long triangle, semblable à une harpe posée horizontalement.

La caisse sonore est de bois, ordinairement de chêne, et à l'intérieur de ses parois repose une table mince de sapin, formée de divers morceaux collés et ajustés ensemble : c'est la table d'harmonie, qui joue dans le piano le même rôle que la table supérieure, aussi de sapin, du violon. C'est elle qui reçoit la première l'impression des vibrations sonores excitées dans les cordes, et ce sont ses fibres qui communiquent ces mêmes vibrations à la caisse du piano et surtout à la masse d'air qui y est enfermée.



Fig. 110. — Piano : disposition des touches et des marteaux.

Au-dessus de la table d'harmonie, et parallèlement à son plan, sont tendues les cordes sur un cadre de fer renforcé de barres, aussi de fer, qui en maintiennent la rigidité et empêchent la déformation qui pourrait résulter de la tension des cordes. Ce sommier est composé de cordes métalliques dont la longueur, la grosseur, sont en rapport avec la hauteur et le volume du son qu'il s'agit de produire. Chaque son est donné par une double corde pour les octaves graves, par une triple corde pour les octaves des sons moyens ou aigus.

Les unes et les autres sont d'acier; mais les cordes graves sont des cordes filées, revêtues d'un enroulement de fils de cuivre rouge ou argenté. Ces combinaisons sont, comme on voit, conformes aux lois des vibrations longitudinales des cordes, qui nous ont appris que les nombres de ces vibrations, c'est-à-dire les hauteurs des sons rendus par une corde sont inversement proportionnelles à sa longueur, à son diamètre, à la force qui la tend.

L'instrument est construit de manière à laisser à la libre dis-

position de l'accordeur un de ces éléments, c'est-à-dire la tension de chaque corde. A l'aide d'un instrument de fer, ou clef, l'accordeur tend chacune des cordes de manière à produire la série des sons de la gamme diatonique et chromatique, ce qui se fait ordinairement par voie de comparaison, de quinte en quinte, et exige une grande justesse d'oreille et une certaine habileté, car il faut tenir compte du tempérament [1].

Supposons donc effectuée cette opération indispensable : le piano est accordé et toutes les séries des cordes successives sont tendues, de manière à vibrer à l'unisson des notes qui composent les six à sept octaves de son clavier, avec leurs dièses et bémols. Comment, maintenant, met-on chaque corde ou plusieurs cordes à la fois en vibration?

Tout le monde sait que c'est en appuyant les doigts des deux mains sur des touches d'ivoire et d'ébène disposées horizontalement, et en les tenant abaissées plus ou moins longtemps dans le sens vertical. Mais on ne connaît pas aussi nettement le mécanisme qui produit les vibrations sonores, les arrête ou les prolonge à volonté, les atténue ou leur donne toute leur ampleur. On va voir que ce mécanisme est en réalité fort simple.

Au-dessous des cordes, sont disposés autant de marteaux *m*, *m*, *m*, qui, dans l'état de repos de chaque touche, restent rangés les uns à côté des autres à une certaine distance de la corde double ou triple qui correspond à chacun d'eux (fig. 110). Vient-on à appuyer sur une touche, c'est-à-dire à abaisser un bras du levier qui la constitue, que l'autre bras se relève : le mar-

1. Plusieurs tentatives ont été faites pour donner au piano la série entière des sons de la gamme enharmonique, mais nous ne sachions pas qu'elles aient réussi. Cela est fâcheux, parce que, à notre avis du moins, l'infériorité musicale du piano sur les instruments tels que le violon est due en grande partie à cette nécessité du tempérament qui fait que le piano est un instrument faux, rigoureusement parlant.

La multiplicité des touches n'est point un obstacle suffisant. Ne voyons-nous pas les organistes jouer sur cinq claviers? Enfin, sans rendre les touches plus nombreuses, ne pourrait-on, par un jeu de pédales, obtenir distinctement les bémols et les dièses de chaque note?

teau correspondant est projeté brusquement dans le sens vertical et va choquer la corde correspondante, qui entre alors en vibration sous l'influence de ce choc. Il nous reste à faire voir comment s'effectue ce mouvement du marteau, comment celui-ci retombe après le choc sans rebondir et sans faire de bruit. La figure 111 va nous faire comprendre tout le mécanisme. Suivons, pour cela, la série des effets que provoque le mouvement d'abaissement de la touche.

ab est la corde sonore, AOB la touche mobile autour du point O. En appuyant en B, le bras de levier OA se relève, fait lever un échappement G qui va frapper sur l'extrémité *e* du manche *t* du marteau M. Ce dernier, qui se trouvait placé

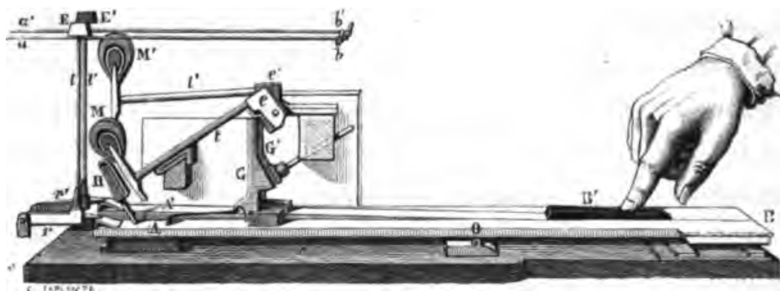


FIG. 111. — Piano : mécanisme des marteaux et des touches.

d'abord en MM', prend alors la position M', et frappe la corde, qui résonne sous l'influence de la percussion. Mais l'échappement, après avoir élevé le marteau d'une certaine quantité, est lui-même arrêté par un bouton posé obliquement; il quitte le nez de la noix du marteau, qui retombe à sa position primitive sur un petit chevalet H, qu'on nomme la *chaise*. Celle-ci empêche le marteau de rebondir et amortit le bruit qu'il pourrait faire.

Ajoutons que les cordes qui forment chaque note, et qui sont frappées ensemble quand le doigt appuie sur une touche, continueraient à résonner après le choc si elles n'étaient munies de petites pièces de bois garnies de feutre, nommées *étouffoirs*. Dès que le doigt appuie sur une touche, l'étouffoir E' est soulevé et la corde vibre; il reste soulevé si le doigt continue de presser la

touche; il retombe au contraire, et éteint la vibration sonore, dès que le doigt quitte la note.

Il reste à dire par quel mécanisme les pédales permettent, tantôt d'accroître, tantôt de diminuer l'intensité du son. L'une d'elles communique en effet par un levier avec tout le système des étouffoirs; quand on appuie le pied, une tringle verticale agit sur ce système et tous les étouffoirs se lèvent en même temps; chaque note est ainsi prolongée et donne un son plus intense; de plus elle communique ses propres vibrations à ses harmoniques, de sorte que la sonorité de l'instrument en est considérablement augmentée. Au contraire, si c'est sur l'autre pédale qu'agit l'exécutant, un léger mouvement de gauche à droite est communiqué au clavier; chaque marteau ne frappe plus à la fois qu'une ou deux des trois cordes destinées à former le son, dont l'intensité se trouve ainsi diminuée d'un ou de deux tiers.

Le piano ne remonte pas au delà de la seconde moitié du XVIII[e] siècle. Il n'est autre que le *clavecin* perfectionné, instrument originaire d'Italie, d'où il a été importé en France et dans les autres pays d'Europe. Le clavecin avait souvent plusieurs claviers; mais ce qui le distingue aussi du piano moderne, c'est le mode par lequel les cordes métalliques entraient en vibration. On vient de voir que dans le piano c'est la percussion d'un marteau qui les fait résonner; dans le clavecin, les touches faisaient mouvoir de petites pièces de bois nommées *sautereaux*, qui étaient munies d'une pointe de plume de corbeau. C'est cette pointe qui pinçait les cordes. Aussi les sons du clavecin n'avaient-ils pas le même caractère, le même timbre que ceux du piano; ils étaient plus maigres, plus mordants, moins moelleux, d'une sonorité moins douce et à la fois moins intense. L'*épinette* était une espèce de petit clavecin n'ayant qu'une corde pour chaque touche, et dès lors un seul rang de sautereaux. C'est la forme primitive du clavecin lui-même.

CHAPITRE IV

LES INSTRUMENTS A VENT

Pour distinguer nettement les instruments de musique dont les sons sont produits par les vibrations des cordes de ceux qu'on nomme instruments à vent, il faut considérer non-seulement le mode de production du son, mais aussi la nature du corps dont les vibrations déterminent les qualités musicales du son produit, c'est-à-dire la hauteur, l'intensité et le timbre.

Nous venons de voir que généralement, dans les *instruments à cordes*, le corps sonore se compose non-seulement des cordes vibrantes, mais d'une caisse de bois ou métal et de la masse d'air qu'elle contient. Or, la corde seule, par sa grosseur, sa longueur, sa tension, la substance dont elle est formée, détermine la hauteur musicale du son et en partie son timbre. La caisse et l'air, qui entrent aussi en vibration quand la corde est frottée, pincée ou percutée, n'interviennent que pour renforcer le son produit, mais sans modifier sa hauteur; ils ont également une grande influence sur le timbre, en donnant la prépondérance à tel ou tel des harmoniques du son fondamental; ils restent sans influence appréciable sur la hauteur musicale.

Dans les *instruments à vent*, que nous allons maintenant décrire, le corps sonore, la masse vibrante, est une colonne d'air

dont la forme varie avec celle des parois où elle est renfermée : ce sont les variations de dimension et de forme de cette colonne qui causent les variations dans la hauteur musicale des sons produits, et les parois du tuyau n'agissent que pour modifier la sonorité ou l'intensité de ces sons. Le mode de production du son est donc par cela même fort différent de celui qu'on emploie pour les instruments à cordes. C'est ici la colonne d'air qu'il faut faire vibrer, ce à quoi on parvient en imprimant un mouvement vibratoire à une portion de cette colonne, située ordinairement à l'une des extrémités, et munie d'un appareil ou embouchure qui rend facile cette mise en vibration. En général, c'est par une insufflation produite par les lèvres de l'exécutant, ou par une soufflerie mécanique, que les vibrations se produisent et se communiquent à l'air contenu dans l'instrument. De là le nom d'*instruments à vent* donné à ces instruments de musique.

Les instruments à vent sont très-variés de formes, de dimensions, de mécanisme : les uns sont construits en bois, d'autres en métal et même en verre ou en cristal. Mais le mode le plus rationnel de classification est celui qui les distingue par l'espèce d'embouchure qui les caractérise. Nous trouverons ainsi les instruments de musique *à embouchure de flûte :* ce sont ceux qui ont pour types la *flûte* elle-même ou les tuyaux d'orgue qui nous ont servi à étudier les vibrations des colonnes gazeuses dans les *Phénomènes de la physique;* puis viendront les instruments *à anche battante* ou *libre :* la *clarinette,* le *hautbois,* sont les deux types principaux de cette série; enfin les instruments à vent *à embouchure à bocal :* le *cor d'harmonie,* la *trompette* et la plupart des instruments de cuivre.

Pour résumer cette variété d'instruments musicaux, nous décrirons enfin l'*orgue,* qui est comme la synthèse des instruments à vent, puisqu'on y trouve tous les types, tous les timbres, depuis les sons les plus graves et les plus mordants jusqu'aux sons les plus aigus ou les plus suaves.

§ I — Instruments a embouchure de flute — Le Flageolet, la Flute, le Fifre

La figure 112 montre en quoi consiste l'embouchure de flûte, et comment les vibrations de la colonne d'air sont produites

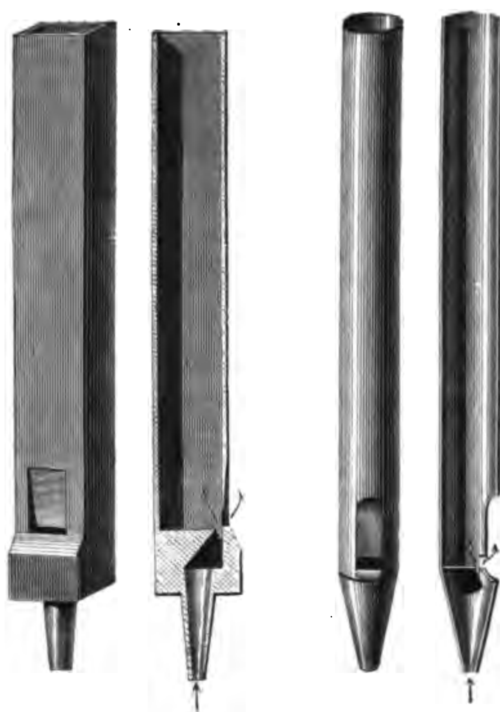


Fig. 112. — Tuyaux d'orgue à embouchure de flûte.

par l'insufflation. Le courant amené par la soufflerie vient frapper les parois taillées en biseau, et s'y divise en deux courants, dont l'un agit sur la colonne intérieure et la fait entrer en vibration : le mouvement vibratoire est la suite des compressions et réflexions successives des lames d'air sur l'arête du biseau.

Nous rappellerons que si l'on met en vibration les colonnes

d'air enfermées dans des tuyaux dont la section est faible, relativement à la longueur, les sons produits ont des hauteurs inversement proportionnelles aux longueurs des tuyaux. Cela est vrai pour les tuyaux bouchés — ceux qu'on nomme *bourdons* dans l'orgue — comme pour les tuyaux ouverts. Seulement, pour deux tuyaux de même longueur, le son fondamental est, dans le tuyau ouvert, l'octave supérieure du son fondamental produit par le tuyau fermé.

Outre le son fondamental, les tuyaux sonores produisent, quand on donne à la soufflerie une intensité croissante, les sons harmoniques successifs représentés par les nombres 1, 2, 3, 4, etc., dans les tuyaux ouverts, et les harmoniques impairs, 1, 3, 5, du son fondamental dans les tuyaux fermés.

Ces lois suffisent à l'intelligence des phénomènes d'acoustique musicale que présentent les instruments à vent, et des règles qui ont présidé à la construction de chacun d'eux. La forme et la substance dont les tuyaux y sont formés, le mode d'embouchure et la façon dont cette embouchure est attaquée, ne font que modifier le timbre des sons produits, leur intensité, leur douceur, et enfin ces qualités qui dépendent, pour les trois quarts, de l'habileté de l'artiste, mais que la physique ne saurait analyser.

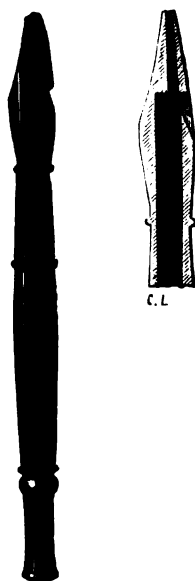
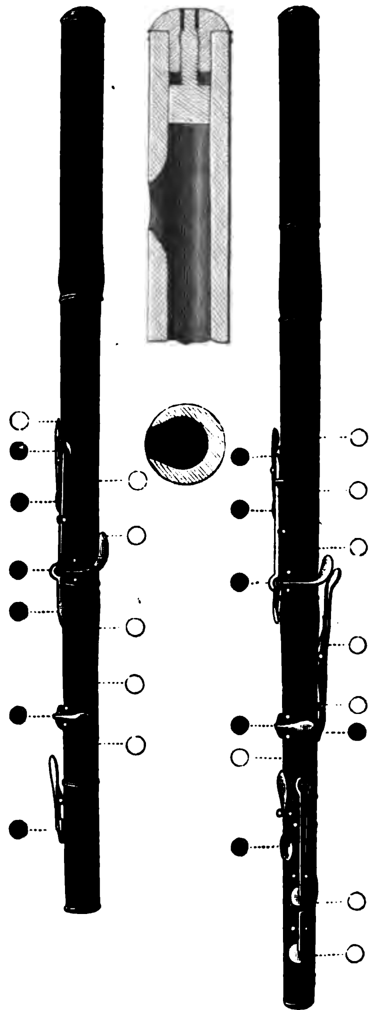


Fig. 113. — Le flagcolet. Coupe de l'embouchure.

Les *sifflets*, les *flageolets*, les *fifres*, sont les plus simples des instruments à embouchure de flûte. Dans les deux premiers, un tuyau plus ou moins long est adapté à cette embouchure, qui ressemble entièrement à celles représentées plus haut, sauf que l'extrémité est taillée de façon à entrer commodément entre les lèvres de celui qui joue de ces instruments.

Le tuyau est percé d'un certain nombre de trous pratiqués en des points qui correspondent aux nœuds de la colonne gazeuse

intérieure. Quand ces trous sont tous bouchés par les doigts de l'artiste, les sons produits sont le son fondamental et ses harmoniques 2, 3, 4, c'est-à-dire l'octave supérieure, la tierce au-dessus de cette octave, la double octave, etc. En levant successivement les doigts dans un ordre convenable, on obtient les sons intermédiaires de la gamme naturelle; les dièses et bémols se produisent en ne bouchant les trous qu'à moitié.


Fig. 114. — La flûte. Coupe longitudinale et transversale de l'embouchure.

Dans la flûte et le fifre, l'embouchure est un trou ovale dont les bords sont taillés en biseau, au devant duquel on souffle avec les lèvres : ce sont celles-ci qui servent de porte-vent. Il y a, de plus, cette différence que le courant d'air déterminant les vibrations a une direction transversale à celle du tuyau.

On fait des flûtes de bois, buis ou ébène, d'ivoire, de cristal. Le nombre des trous, des clefs qui servent, soit à les boucher, soit à les ouvrir, varie selon les instruments. La figure 114 en donne deux spécimens. Au dernier siècle, la flûte qu'on nommait *flûte traversière*, pour la distinguer de la flûte à bec, était beaucoup plus simple : elle n'avait que sept trous, et son étendue ne dépassait pas trois octaves.

Les *fifres* sont de petites flûtes à six trous, dont les sons vifs

et éclatants se détachent sur l'ensemble du morceau. On les emploie fréquemment dans la musique militaire.

§ II — Instruments a vent a anche — La Clarinette, le Hautbois, le Basson

On donne le nom d'*anche* à une lame élastique qu'on dispose à l'ouverture des tuyaux sonores pour recevoir l'action du courant d'air producteur du son.

Cette lame *ab* (fig. 115) est adaptée au devant de l'ouverture d'une pièce creuse *cd*, de bois ou de métal, qu'on nomme *rigole*. La lame, ou *languette*, ferme la rigole quand elle s'appuie exactement sur ses bords; elle laisse passage à l'air quand elle n'est pas pressée et qu'elle se tient écartée des bords dans sa position normale. Du reste, une tige métallique *m*, la *rasette*, qu'on peut enfoncer plus ou moins en appuyant sur la languette *t*, permet d'augmenter ou de diminuer la longueur de la partie libre de celle-ci. C'est cette partie libre qui, grâce à son élasticité, entre en vibration sous l'influence du vent, et communique ce mouvement vibratoire à la colonne gazeuse du tuyau sonore.



Fig. 115. Anche battante.



Fig. 116. Anche libre.

Cette espèce d'anche se nomme *anche battante*.

Dans l'*anche libre* (fig. 116), la languette s'adapte exactement à l'ouverture d'une petite boîte prismatique qui communique

avec la bouche du tuyau. Elle peut osciller en dehors et en dedans de cette ouverture, en faisant de part et d'autre des mouvements d'amplitude égale : c'est en celà principalement que l'anche libre diffère de l'anche battante, dont les sons sont plus durs, plus criards.

Qu'est-ce qui, dans l'anche, produit le son? Ce ne sont pas les vibrations de la substance métallique qui la compose, mais celles que produisent les sorties et rentrées périodiques de l'air. Le nombre des vibrations détermine, il est vrai, la hauteur du son. Il faut donc que l'anche adaptée à un tuyau ait des dimensions convenables, et soit formée d'une substance d'une élasticité déterminée, pour que ses vibrations soient isochrones avec celles de la colonne d'air du tuyau. La rasette permet, d'ailleurs, d'obtenir cet unisson. Nous verrons, en parlant des jeux d'orgue, comment on modifie les sons produits par les anches, en leur adaptant des tuyaux de formes variées qui reçoivent alors le nom de *cornets d'harmonie*.

Un mot maintenant des instruments de musique dont les sons sont obtenus à l'aide d'anches de formes un peu différentes des anches adaptées aux tuyaux d'orgue, mais vibrant, d'ailleurs, de la même manière.

C'est d'abord la *clarinette*, dont l'embouchure est formée par une lame de roseau adaptée à un bec de buis, d'ébène ou d'ivoire, que l'exécutant fait vibrer en soufflant à l'intérieur de l'étroite ouverture qui les sépare. Ce sont les lèvres du joueur qui, en appuyant avec plus ou moins de force contre les deux côtés du bec de l'instrument, jouent le rôle de la rasette et donnent lieu à un mouvement vibratoire plus ou moins rapide.

Les sons produits par le tuyau vibrant dans toute sa longueur, c'est-à-dire quand les trous sont bouchés par les doigts, forment la série naturelle des harmoniques des tuyaux ouverts. Comme dans la flûte, on obtient les sons intermédiaires des gammes diatoniques et chromatiques, en ouvrant les trous successivement ou simultanément, soit en levant les doigts, soit en appuyant sur les *clefs* ou soupapes de l'instrument. Le tuyau

de la clarinette est terminé par une sorte de pavillon, d'ailleurs peu évasé, comme le montre la figure 117.



Fig. 117. — La clarinette. Coupe de l'embouchure.

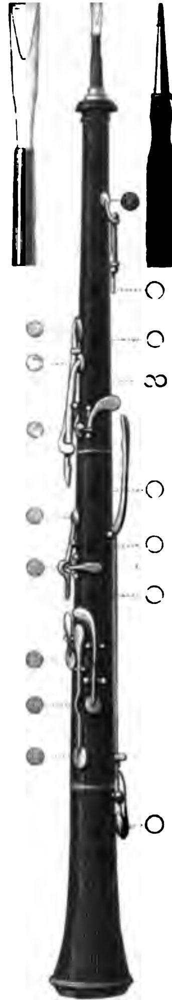


Fig. 118. — Le hautbois. Anche vue de face et de côté.

L'anche du *hautbois* est formée de deux lames de roseau appliquées l'une contre l'autre par leurs bords et se présentant leurs concavités. Introduites dans la bouche de l'artiste exécutant, elles vibrent sous l'influence du courant d'air produit par

l'insufflation, et la longueur de la partie vibrante dépend de la façon dont les lames élastiques sont pressées par les lèvres.

Le *basson* est un instrument du même genre que le hautbois, mais formé de tuyaux d'un plus grand volume et produisant des sons qui résonnent à une quinte au-dessous de l'octave inférieure des sons du hautbois. Le basson joue donc, vis-à-vis du hautbois, le rôle que le violoncelle joue vis-à-vis du violon.

§ III — Instruments a vent a bocal ou a embouchure de cor

Dans les instruments de musique qui nous restent à passer en revue, l'embouchure est formée simplement d'un tuyau de forme conique évasée, ou d'un tuyau terminé par une cavité hémisphérique qu'on applique contre les lèvres (fig. 119). C'est le mouvement vibratoire des lèvres elles-mêmes qui se communique à la colonne d'air enfermée entre les parois du tuyau diversement contourné, qui constitue le corps sonore de l'instrument. Ces vibrations peuvent être plus ou moins rapides, selon que l'artiste serre plus ou moins la bouche contre l'ouverture, et que le courant d'air qui en résulte offre une section plus ou moins étroite. Il faut une grande habitude pour proportionner exactement les dimensions de cette ouverture, la vitesse et la force du courant à la hauteur des sons qu'on veut obtenir, pour faire vibrer les lèvres à l'unisson du son fondamental de l'instrument et de ses harmoniques. C'est ce qu'on nomme *posséder l'embouchure*.

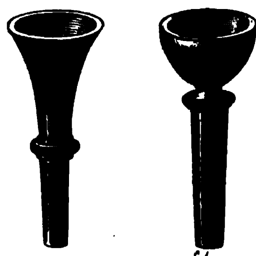


Fig. 119. — Embouchures de cor ou à bocal.

Le type des instruments à vent à embouchure de cor est le *cor*, qui est formé d'un tuyau conique contourné en spirale et terminé par une large partie évasée qu'on nomme le *pavillon*. La *trompe de chasse*, la *trompette*, le *clairon*, sont des instruments du même genre que le cor, généralement fabriqués en

laiton, et qui ne diffèrent les uns des autres que par le volume de la colonne d'air, la forme plus ou moins contournée du tuyau, et enfin les dimensions du pavillon.



Fig. 120. — Le cor d'harmonie.

Les sons que ces instruments produisent sont les harmoniques naturels du son fondamental ou le plus grave; on les obtient



Fig. 121. — Trompe de chasse.

comme nous avons dit plus haut. Mais, pour avoir les sons intermédiaires de la gamme, il faut boucher avec la main fermée d'une façon plus ou moins complète l'ouverture du pavillon : il est difficile, du reste, d'obtenir de la sorte des sons bien

justes et bien purs. L'obstruction de l'ouverture du pavillon leur ôte beaucoup de leur éclat, de leur sonorité.

Aussi a-t-on cherché à augmenter les ressources musicales des instruments de cuivre, en modifiant de diverses manières les longueurs du tuyau sonore ou de la colonne d'air mise en vibration. On a percé de trous convenablement placés, munis de clefs qu'on peut fermer ou ouvrir à volonté, les parois métalliques des instruments. Tel est l'*ophicléide*, la basse des instruments de cuivre, et toute la famille des instruments à clefs, les *saxophones*, ainsi nommés du nom du fabricant qui les a inventés ou qui en a amélioré la fabrication.



Fig. 122. — Trompette et clairon.

Un autre genre de modification est celui qu'on trouve dans le *trombone*, sorte de trompette à coulisse formée de deux parties emboîtées l'une dans l'autre, que l'exécutant peut allonger ou rapetisser à volonté par un mouvement rectiligne de la main droite.

Enfin, un troisième mode est celui des instruments à pistons, tels que le *cor*, le *cornet à pistons*, si connus aujourd'hui dans les orchestres, surtout dans les orchestres militaires.

Les pistons ne sont autre chose que des portions de tuyaux au nombre de deux ou trois, qui s'emboîtent à frottement dans des parties cylindriques communiquant avec le tuyau contourné de l'instrument. Ils sont percés latéralement d'ouvertures qui correspondent à des appendices destinés à accroître la longueur de la colonne vibrante. Suivant que le piston est abaissé ou levé, les ouvertures en question viennent se placer en face de celles des appendices ou se trouvent en contact avec une partie

pleine : la communication se trouve ouverte ou fermée, comme on peut le voir sur les figures 126 et 127, qui représentent une

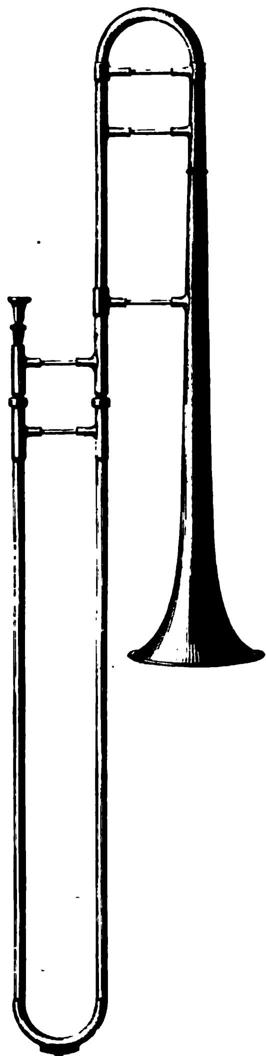


Fig. 123. — Trombone.



Fig. 124. — Ophicléide.

coupe des cylindres logeant les pistons et des pistons eux-mêmes. L'exécutant agit d'ailleurs tantôt sur un seul, tantôt sur deux,

tantôt sur les trois pistons. Les appendices sont eux-mêmes formés de pièces mobiles qu'on peut allonger ou raccourcir dans une



Fig. 125. — Le cornet à piston.

certaine mesure. Enfin, la pièce du tuyau de l'instrument où s'adapte l'embouchure est plus ou moins longue, suivant le ton



Fig. 126. — Coupe des pistons levés.

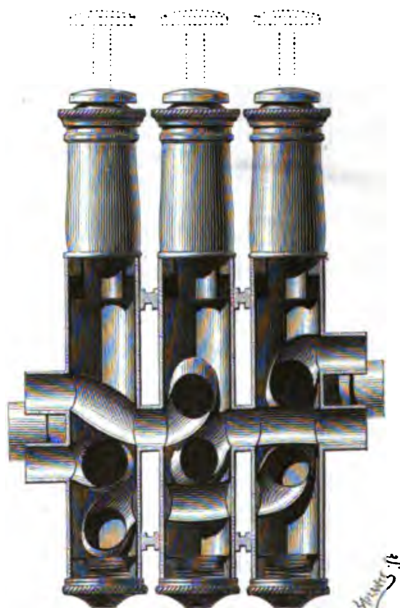


Fig. 127. — Pistons abaissés.

du morceau de musique à exécuter. On peut, de cette façon, accorder l'instrument avec toute la justesse nécessaire.

§ IV — La Cornemuse et la Musette

De tous les instruments à vent que nous venons de passer en revue, les embouchures, embouchures de flûte, à anche ou à bocal, reçoivent de la bouche ou des lèvres de l'artiste le courant d'air, le vent qui met en vibration la colonne d'air du tuyau de

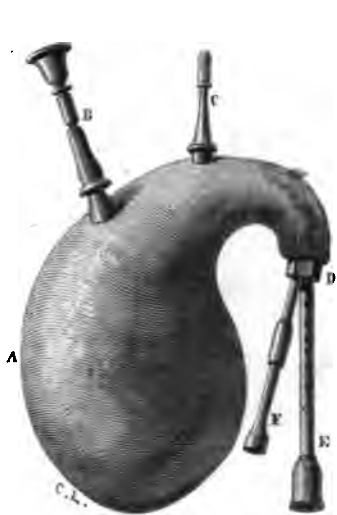


Fig. 128. — Cornemuse.



Fig. 129. — Musette.

l'instrument. Avant d'étudier l'orgue, où le courant dont il s'agit est produit mécaniquement par une soufflerie, nous devons dire deux mots d'un instrument champêtre où l'air, dont la pression doit faire vibrer les anches, est emmagasiné dans un réservoir de peau avec lequel communiquent les embouchures des tuyaux sonores.

C'est la *cornemuse*, qui était déjà connue des anciens Romains sous le nom de *tibia utricularis;* on ne la trouve plus guère aujourd'hui que dans quelques cantons reculés de nos provinces, dans les montagnes de l'Écosse, etc.

En suivant la figure, on comprendra aisément le mécanisme

de l'instrument. A est la peau de mouton qui sert de réservoir d'air, et que le musicien gonfle en soufflant dans le *porte-vent* C : une soupape intérieure s'ouvre de dehors en dedans et permet à l'air d'entrer, mais non de sortir. B, E, F, sont trois chalumeaux, espèces de flûtes ou plutôt de hautbois ouverts au dehors et munis, à leur extrémité intérieure, d'autant d'anches de roseau. B et F se nomment le *gros* et le *petit bourdon* : ils résonnent à l'octave l'un de l'autre. Les chalumeaux E et F sont percés de trous qui permettent d'obtenir des sons intermédiaires entre les sons fondamentaux et leurs harmoniques.



Fig. 130. — Soufflet servant à gonfler la musette.

Quand le musicien a gonflé la cornemuse, qu'il tient embrassée entre son corps et son bras gauche, il la presse avec le coude et force ainsi l'air à s'échapper par les anches, qui vibrent et font sonner les chalumeaux. Par le jeu des doigts, il obtient les sons variés dont l'ensemble forme l'air avec son accompagnement. Il a pu d'ailleurs, accorder préalablement les chalumeaux, qui sont mobiles dans leurs boîtes, et peuvent ainsi être accourcis ou allongés dans une certaine mesure.

La *musette* (fig. 129) est une cornemuse perfectionnée, dont les chalumeaux C D sont munis de clefs comme les instruments que nous avons étudiés plus haut : la flûte, le hautbois, etc., et dont le bourdon E est un cylindre contenant une série de tuyaux auxquels des anches sont adaptées intérieurement. Quelques-uns

de ces tuyaux sont doublement courbés, de manière à rendre des sons d'autant plus graves, que leur longueur totale est plus grande. Des coulisses, qui font saillie à l'extérieur et qu'on nomme des *layettes*, sont mobiles le long du bourdon, et permettent, soit de boucher tout à fait, soit de laisser plus ou moins fermée une fente qui correspond à l'ouverture de chaque tuyau. C'est le bourdon qui fait entendre les accords d'accompagnement dans la musette.

Une autre différence essentielle avec la cornemuse, c'est que le musicien gonfle l'instrument par le porte-vent B, non plus en soufflant avec sa bouche, mais en faisant mouvoir un soufflet (fig. 130) dont la douille s'ajuste avec l'ouverture du porte-vent, et que le joueur porte attaché à sa hanche droite.

La musette a eu une grande vogue au XVIIe siècle, à la cour et à la ville comme aux champs; mais, malgré l'originalité et l'élégance de sa forme et la profusion des ornements dont on la décorait, la mode avait déjà abandonné cet instrument, en somme fort ingrat, quand, à la fin du règne de Louis XIV, le goût de la musique se développa et s'épura. Aujourd'hui la musette n'est plus qu'un souvenir.

CHAPITRE V

L'ORGUE

---

§ I — Précis historique — Les tuyaux sonores et les jeux de l'orgue

L'*orgue* est le plus puissant, le plus grandiose, le plus complet des instruments. C'est ce qu'indique son nom (ὄργανον, en grec, l'instrument, l'instrument par excellence); mais, à vrai dire, c'est plutôt une réunion d'instruments à vent qu'un instrument particulier. Par la variété de ses timbres, par l'étendue de ses voix, depuis les basses les plus graves jusqu'aux notes les plus aiguës des *soprani*, il constitue à lui seul tout un orchestre.

La date de l'invention de l'orgue est incertaine. La tradition la faisait remonter au VIIIe siècle, parce que c'est en 757 que le premier orgue a fait son apparition dans les basiliques chrétiennes de l'Occident. Cet instrument avait été, dit-on, envoyé à Pepin le Bref par l'empereur grec Constantin Copronyme, et il fut installé dans une église de Compiègne. Mais, bien avant cette époque, les Romains se servaient d'un orgue connu sous le nom d'*orgue hydraulique*, parce que c'était la pression

de l'eau qui produisait le mouvement de l'air dans les tuyaux. Ce n'est guère qu'au ve siècle que les soufflets furent substitués au procédé primitif, et que les orgues pneumatiques remplacèrent dans les églises les orgues hydrauliques, dont l'humidité, résultant de l'emploi de l'eau, altérait promptement et détériorait les tuyaux et le mécanisme.

L'orgue est un instrument à vent formé d'une série de tuyaux de grandeurs, de formes et d'embouchures variées, que le vent d'une soufflerie met en vibration successivement ou simultanément. Nous allons décrire sommairement les diverses parties du mécanisme à l'aide duquel l'organiste obtient les effets musicaux propres à ce merveilleux instrument.

La partie purement instrumentale ou musicale de l'orgue comprend un nombre indéterminé de tuyaux sonores qui se rangent par séries, suivant leurs timbres : chaque série se nomme un *jeu*, et les différents tuyaux qui composent un jeu n'ont, comme on voit, de différence que par la hauteur des sons que rend chacun d'eux quand le vent de la soufflerie le fait parler. Un jeu d'orgue est, à proprement dire, l'un des instruments particuliers qui entre dans la composition du morceau musical à exécuter. Aussi l'organiste fait-il parler plusieurs jeux à la fois en observant les lois de l'harmonie, au gré de ses propres inspirations ou en suivant celles du compositeur dont il exécute le morceau.

Citons quelques-uns des jeux des orgues tels qu'on les construisait à la fin du siècle dernier, en faisant remarquer que, outre leurs dénominations particulières, on leur en donne encore d'autres basées sur la longueur du plus grand de leurs tuyaux, celui qui donne le son le plus grave. Cette longueur s'exprimait en pieds. Nous trouvons ainsi :

La *montre*, de seize pieds, dont les tuyaux sont d'étain;

Le *bourdon*, de seize pieds, dont les tuyaux, de deux à trois octaves, sont de bois, tandis que les notes de dessus sont données par des tuyaux de plomb;

La *bombarde*, de seize pieds, d'étain ou de bois. C'est un jeu d'anche; les jeux précédents sont à embouchures de flûte;

Le *prestant* (de quatre pieds) est le premier jeu de l'orgue sur lequel on fait la partition;



Fig. 131. — Jeux d'orgues.

1. Prestant. — 2. Gros nasard. — 3. Nasard. — 4. Cornet. — 5. Flûte. — 6. Trompette. — 7. Voix humaine. — 8. Bombarde. —9. Fourniture.

Le *nasard*, qui sonne une quinte au-dessus du prestant;

La *doublette*, qui est l'octave au-dessus du prestant (de deux pieds, par conséquent);

Le *larigot*, octave au-dessus du nasard.

Viennent ensuite les jeux de *cornet*, de *fourniture*, de *trom-*

pette; puis la *voix humaine*, le *cromorne*, le *clairon*, la *voix angélique*, octave de la voix humaine.

Ces différents jeux sont formés de tuyaux dont les embouchures varient — nous l'avons déjà dit, — dont les longueurs varient — ces longueurs sont calculées d'après les lois des vibrations sonores des tuyaux ouverts ou fermés, — de plus, dont les formes varient aussi. Les tuyaux de bois sont prismatiques ou en forme de pyramides tronquées à base carrée; les tuyaux d'étain ou d'*étoffe*, alliage formé d'une partie de plomb ou d'une d'étain, sont de forme cylindrique, ou de forme conique se terminant en pointe, ou enfin de forme conique évasée comme des pavillons. La figure 115 fait voir la forme du bourdon de seize pieds et celle de la montre de seize pieds. Dans la figure 131, on peut voir quelles sont les formes des tuyaux de quelques-uns des jeux que nous avons cités plus haut. Il y a des tuyaux ouverts, des tuyaux bouchés totalement, et enfin des tuyaux à cheminée, c'est-à-dire bouchés partiellement. Les tuyaux fermés, de bois, s'accordent au moyen du tampon garni de cuir qui en bouche l'ouverture supérieure, en l'enfonçant plus ou moins et en modifiant ainsi la longueur de la colonne vibrante. Les tuyaux de plomb s'accordent le plus souvent à l'aide des *oreilles*, plaques de plomb flexibles soudées de chaque côté de la lumière; on ouvre ou l'on ferme plus ou moins ces valves mobiles, qui augmentent ou diminuent la largeur de la colonne d'air qui s'échappe de la lumière. Enfin, les tuyaux à anche s'accordent en se servant de la rasette pour allonger ou raccourcir la longueur de la lame métallique vibrante qui est appliquée contre l'ouverture.

Tous ces jeux n'ont pas une égale étendue musicale, ou, ce qui revient au même, ne sont pas formés d'un égal nombre de tuyaux sonnant chacun une des notes de la gamme. C'est ainsi qu'en partant du *prestant*, qui embrasse quatre octaves, deux octaves aiguës et deux octaves graves, on trouve la *flûte*, le *clairon*, la *voix angélique*, qui ont la même étendue que le prestant. Tous les cornets, *grand cornet*, *cornet de récit*,

cornet d'écho, n'embrassent chacun que deux octaves, depuis la première octave au-dessous du ton, jusqu'à la première, la deuxième et la troisième au-dessus du ton. La *voix humaine*, le *cromorne*, la *trompette*, le *bourdon* de huit pieds, donnent quatre octaves, trois graves et une aiguë. La *bombarde*, la *montre* et le *bourdon* de seize pieds embrassent quatre octaves graves.

Les jeux que nous venons de passer en revue appartiennent aux orgues telles qu'on les construisait à la fin du siècle dernier; en y joignant 5 jeux de pédales on arrivait, pour un orgue complet, à un ensemble de 30 jeux différents. Le nombre en a été bien augmenté depuis : l'orgue de Harlem, l'un des plus fameux qui existent, a 60 jeux et 5000 tuyaux; les orgues de Liverpool et d'Ulm ont chacun 100 jeux. Mais le plus complet, sous ce rapport, est sans contredit le grand orgue de Saint-Sulpice, à Paris, où le nombre des jeux s'élève à 100 et celui des tuyaux sonores à 7000.

§ II — Mécanisme de l'orgue — Soufflerie et porte-vent — Sommiers et registres — Claviers, abrégé, pédales

Maintenant, la partie instrumentale ou purement musicale de l'orgue étant connue, il nous reste à faire voir quelle est la disposition des tuyaux sonores; comment et par quel mécanisme l'exécutant les fait parler successivement ou simultanément, de manière à rendre les effets mélodiques et harmoniques du morceau qu'il joue; comment enfin, à son choix, il emploie tel ou tel jeu.

Pour plus d'ordre et de clarté, décrivons d'abord l'ensemble.

Tous les tuyaux des divers jeux sont rangés verticalement dans une construction de menuiserie plus ou moins ornée et plus ou moins considérable, qu'on nomme le *fût* ou le *buffet d'orgues*. Le plus souvent le buffet d'orgues est double et se compose, en avant, d'un petit orgue qu'on nomme le *positif*,



PLANCHE VIII — ORGUE DE SAINT-BRIEUC,

Construit par M. Cavaillé-Coll.

et, en arrière, du *grand orgue*. C'est entre les deux que se placent les *claviers* que touche l'organiste. On place ordinairement dans les hauteurs du buffet du grand orgue une troisième partie, plus petite que le positif et ayant son sommier, ses jeux : c'est le *récit*, qui renferme ceux des jeux de l'orgue les plus appropriés à l'exécution des solos.

Le vent est donné aux tuyaux par une *soufflerie* qu'on meut à bras d'homme et qu'on peut concevoir mue par un système moteur quelconque. L'air, plus ou moins comprimé, passe de



FIG. 132. — Sommier garni de ses tuyaux.

la soufflerie dans des canaux ou *porte-vent*, et, de là, dans les gravures des *sommiers*. On entend par *sommiers*, les caisses au-dessus desquelles sont disposés les tuyaux des différents jeux. En faisant mouvoir, à l'aide de boutons mis à la disposition de la main de l'organiste, des pièces qu'on nomme *registres*, le vent se trouve en communication avec tel ou tel jeu, et si alors l'exécutant appuie sur les touches des *claviers*, un mécanisme particulier, l'*abrégé*, fait ouvrir des soupapes disposées au-dessous de l'ouverture des tuyaux, qui parlent alors en rendant les sons correspondant aux notes ou aux touches des claviers.

Voyons maintenant chacune des parties de l'orgue que nous venons de passer en revue, afin que le lecteur puisse se faire une idée claire du fonctionnement de cet immense appareil musical.

ABC (fig. 132) est un *sommier*. Plusieurs séries de tuyaux sonores, T, T′, T″, sont disposées verticalement au-dessus du sommier par rangées parallèles, dont chacune, telle que TT, constitue un jeu. Par leur pied, les ouvertures des tuyaux pénètrent à l'intérieur du sommier, dont la table supérieure se nomme *chape* du sommier. Un peu au-dessous de leurs embouchures, une seconde table, le *faux sommier*, *abd*, les maintient verticaux.

Le vent est amené de la soufflerie par les *porte-vent* à l'intérieur d'une sorte de caisse ABD placée en avant du sommier et à sa partie inférieure : c'est ce qu'on nomme la *laie*. Il nous reste à dire maintenant comment, de la laie, le vent peut passer dans les tuyaux. Pour cela, le dessus du sommier, outre la chape percée de trous où s'emboîtent les tuyaux, comprend un suite de rainures dont chacune court le long des tuyaux d'un même jeu, et qui sont séparées les unes des autres par des barres parallèles qu'on nomme les *registres dormants*. Le fond de ces rainures est percé de trous situés verticalement au-dessous des tuyaux du jeu. Enfin une barre mobile, également percée de trous, peut glisser dans chaque rainure : c'est le *registre*, *c*R, *c*′R′, *c*″R″..... Or, quand le registre est ouvert, c'est-à-dire quand l'organiste a tiré le bouton qui correspond au jeu qu'il veut faire parler, tous les trous du registre se trouvent vis-à-vis de ceux de la chape et des rainures qui répondent au jeu : le vent peut donc arriver à l'ouverture de chaque tuyau. Mais alors il ferait parler à la fois tous les tuyaux d'un même jeu, si une disposition spéciale ne fermait le passage du vent pour tous les tuyaux qui ne correspondent point précisément à la note ou aux notes dont l'exécutant abaisse les touches. Le dessous du sommier est, pour cela, formé de compartiments, de rainures transversales qu'on nomme les *gravures*. Chaque

gravure AB (fig. 133) communique avec la laie L qui renferme le vent, par une soupape S; de sorte que si cette soupape est ouverte, le vent pénètre dans la gravure correspondante. Chaque gravure répondant à une même note, c'est-à-dire à tous les tuyaux des divers jeux du sommier susceptibles de rendre cette note, le vent qui vient d'y pénétrer par la soupape ouverte ne fera parler que le tuyau ou les tuyaux des jeux dont les registres sont ouverts.

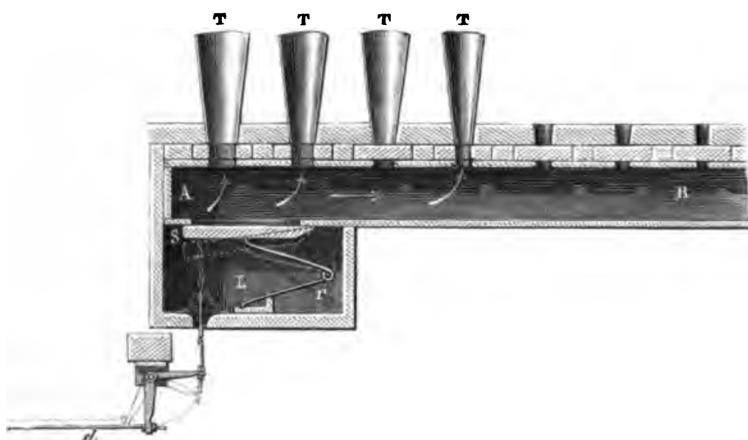


FIG. 133. — Coupe transversale du sommier. — Laie et soupape.

Le clavier de l'orgue est semblable à celui du piano, avec cette différence que chaque orgue possède plusieurs claviers. En abaissant une touche avec le doigt, l'organiste fait mouvoir, par l'intermédiaire d'un mécanisme d'ailleurs fort simple, qu'on nomme *abrégé*, des tiges ou tringles *d* qui, articulées à un levier coudé, font ouvrir les soupapes et amènent ainsi le vent dans les gravures des sommiers. Outre les claviers à touches manœuvrés par les mains de l'exécutant, il y a des claviers de pédales qui correspondent à des jeux particuliers, et qui sont mis en mouvement à l'aide des pieds. Les pédales sont entièrement consacrées aux basses.

Pour résumer, supposons l'organiste assis sur son siége en face des claviers. Les souffleries sont en action, et, par consé-

quent, l'air est dans les porte-vent à la pression convenable.

L'organiste commence par tirer les jeux dont il veut se servir pour l'exécution du morceau musical qu'il a en vue : c'est ce qu'il fait en tirant les boutons qui sont à sa portée tout autour du clavier. Les barres font mouvoir une série de leviers qui ouvrent les registres correspondants.

Cela fait, aucun tuyau ne parle encore, bien que les laies des sommiers soient remplies du vent prêt à remplir son office partout où besoin sera. L'organiste pose-t-il le doigt sur l'une des touches d'un des claviers, aussitôt l'une des soupapes de l'intérieur de la laie d'un sommier s'ouvre, le vent pénètre dans la gravure correspondante, et de là dans les tuyaux dont les registres sont ouverts; même chose arrive si, du pied, il abaisse l'une ou l'autre des pédales. A partir de ce moment, l'orgue est en action, et les mélodies, comme les accompagnements harmoniques, s'échappent de son sein au gré de l'exécutant.

Nous avons suivi, pour décrire l'orgue et son mécanisme, la construction telle qu'elle était à la fin du siècle dernier et que la décrit, avec les plus minutieux détails, la grande *Encyclopédie* de Dalembert et Diderot. La raison en est qu'un grand nombre d'orgues existant encore sont faites d'après ce modèle. Mais on conçoit que, depuis un siècle, les facteurs d'orgues aient réalisé des perfectionnements de détail en rapport avec les progrès de l'industrie et de l'art depuis cette époque.

Le mécanisme de ce merveilleux instrument est devenu plus régulier, plus sûr, et il a gagné à la fois en étendue, en puissance et en sonorité. On en pourra juger par quelques détails relatifs à des orgues nouvellement construites en France, et dont les plus remarquables sont sans contredit les orgues de Saint-Denis, celles de Notre-Dame et de Saint-Sulpice, à Paris. Un facteur français, M. Cavaillé-Coll, a particulièrement attaché son nom à ces instruments magnifiques [1].

1. Voici, d'après un célèbre organiste contemporain, M. G. Schmitt, les noms des principaux facteurs qui ont contribué au perfectionnement de l'orgue. Ce sont : en

Un mot d'abord sur la soufflerie. Voici ce que nous lisons à cet égard dans le rapport officiel sur la réception du grand orgue de Notre-Dame :

« La soufflerie se compose d'une grande soufflerie alimentaire, à double réservoir, avec quatre paires de pompes pouvant fournir environ 400 litres d'air par seconde, et d'une soufflerie à forte pression armée de deux paires de pompes fournissant par seconde 200 litres d'air. Outre les quatre grands réservoirs régulateurs placés à proximité des sommiers qu'ils alimentent, on trouve encore dans l'intérieur de l'orgue deux grands réservoirs régulateurs à forte pression; quatre autres réservoirs régulateurs pour le récit, le grand chœur et les dessus du clavier de positif et de bombarde; un grand nombre de récipients d'air disséminés dans toute l'étendue de l'orgue, et armés de ressorts pour éviter toute espèce d'altération dans la pression du vent. »

L'utilité de ces différents réservoirs, qui ne contiennent pas moins de 25 000 litres d'air comprimé, se comprendra si l'on songe que tel tuyau ne dépense pas plus d'un centilitre d'air par seconde, tandis que les gros tuyaux de trente-deux pieds en absorbent chacun 70 litres pendant le même temps.

Nous avons vu par quel mécanisme simple on communiquait le mouvement des touches du clavier aux soupapes qui correspondent à une série déterminée de tuyaux. La résistance à vaincre était, pour l'organiste, une fatigue que le mécanisme inventé par Barker a beaucoup allégée. Ce mécanisme consiste dans l'emploi d'un soufflet moteur interposé entre la touche du clavier et la soupape dont il vient d'être question. Ce soufflet, mis en relation avec la soufflerie par un porte-vent et une soupape spéciale sur laquelle agit la touche, se gonfle et exerce un effort suffisant pour vaincre la résistance de la soupape placée

France, MM. Erard, Cavaillé-Coll, Barker, d'Allery, Callinet, J. Abbey, Suret et Stein; en Allemagne, MM. Zuberbier, Walker, Haupt, Hildebrand, Ratzmann, Vorenweg, Engler, Maass et Breidenfeld; en Angleterre, MM. Hill, Bishop, Telfort, Gray et Davison, Bevington.

dans le sommier, de sorte que l'effort du doigt de l'organiste ne s'exerce plus sur la soupape à large surface, mais sur la petite soupape alimentaire du soufflet moteur.

M. Cavaillé-Coll a encore perfectionné ce mécanisme, mais il a eu aussi l'heureuse pensée d'en appliquer le principe à la manœuvre des registres, de façon à réduire encore le travail mécanique de l'exécutant, pour accroître d'autant sa part d'attention et d'efforts dans ce qui est du pur domaine de l'art.

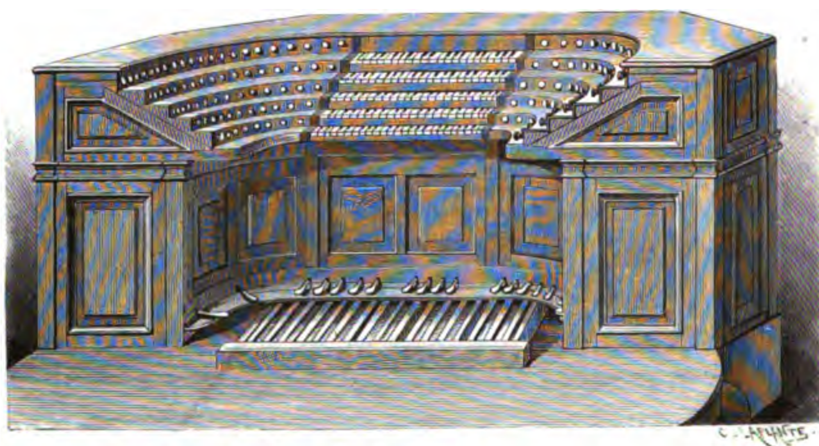


FIG. 134. — Claviers du grand orgue de Notre-Dame de Paris.

Le nombre et la variété des jeux ont été aussi considérablement augmentés dans les orgues récemment construites. L'orgue de Notre-Dame ne comprend pas moins de cinq claviers à main et un clavier de pédales. Voici les nombres de jeux et de tuyaux que fait parler chacun de ces claviers :

Clavier de pédales...........	16	jeux et	480	tuyaux
— du grand chœur......	12	—	672	—
— du grand orgue.......	14	—	1088	—
— de bombarde.........	14	—	945	—
— du positif............	14	—	989	—
— du récit.............	16	—	1072	—

Le clavier de pédales s'étend de *ut* à *fa* et comprend 30 notes; et chacun des claviers à main s'étend de *ut* à *sol* et possède

56 notes : en tout, 86 jeux, 5246 tuyaux, plus 12 registres et 22 pédales de combinaison.

L'orgue de Saint-Sulpice, bien que ne l'emportant pas sur celui de Notre-Dame par la perfection de sa facture et par sa puissance, lui est supérieur par le nombre de ses jeux, qui n'est pas moindre de 100, sans compter 10 registres et 20 pédales de combinaison. Il ne renferme pas moins de 7000 tuyaux. Un célèbre organiste allemand, M. A. Hesse, parle en ces termes de l'orgue de Saint-Sulpice :

« Le son de l'orgue plein est gigantesque; j'ai joué quelques morceaux avec 100 jeux tonnants. L'harmonie est de la plus grande pureté, le vent d'une égalité parfaite. Les 29 jeux d'anches sont beaux et brillants; ils parlent si promptement, qu'on peut exécuter des quadruples croches. La bombarde, de trente-deux pieds, se compose d'énormes tuyaux d'étain avec une très-longue embouchure; elle parle aussi facilement que les cordes d'un bon violoncelle. Je dois déclarer que, de tous les instruments que j'ai vus, examinés et touchés, celui de Saint-Sulpice est le plus parfait, le plus harmonieux, le plus grand et réellement le chef-d'œuvre de la facture d'orgues moderne. »

Terminons ce que nous avions à dire des instruments à vent par une simple mention de l'*orgue à cylindre*, connu sous le nom populaire d'*orgue de Barbarie*. Restituons d'abord à cet instrument son nom véritable, qui est celui de son inventeur. Il faut dire : *orgue de Barberi*, et non pas de *Barbarie*. Barberi est, en effet, le nom du facteur de Modène qui a imaginé cet instrument automatique. En tournant une manivelle, on fait mouvoir un cylindre muni de cames plus ou moins allongées, qui font mouvoir les touches d'un clavier. A ces touches correspond un mécanisme qui fait jouer une série de jeux dont les tuyaux, mis en vibration par l'air d'une soufflerie, résonnent et peuvent reproduire ainsi un morceau musical.

Outre les petites orgues portatives qu'on voit circuler dans les rues, on en exécute ayant de plus grandes dimensions et que

l'on traîne sur de petites voitures : c'est un de ces derniers instruments que représente la figure 135. Ils n'ont pas, sans doute, une grande valeur au point de vue de la perfection des sons, et

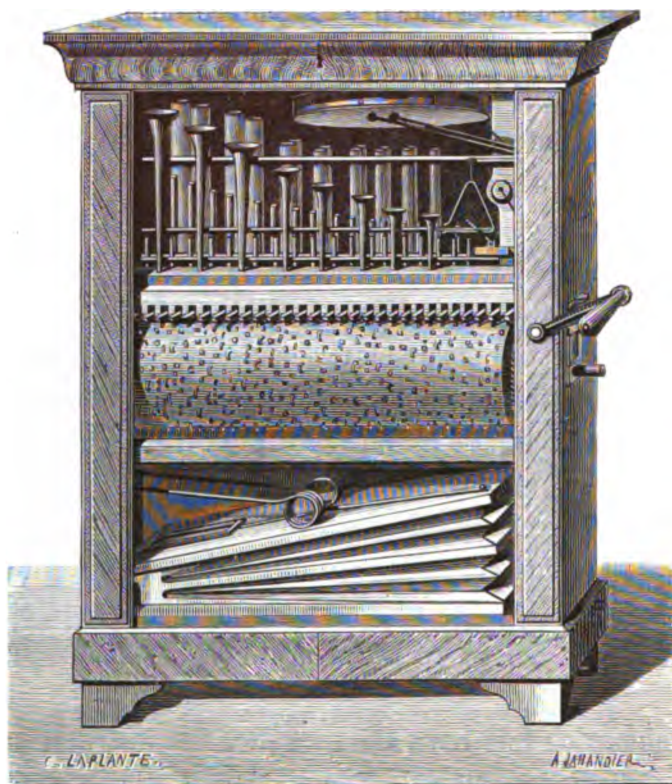


Fig. 135. — Orgue de Barberi, dit vulgairement *orgue de Barbarie.*

la musique qu'ils jouent n'est pas toujours fort agréable pour les oreilles des dilettanti; mais ils servent à populariser, à la campagne et à la ville, les plus beaux airs des compositeurs, ouvertures, marches d'opéras, symphonies. A ce titre, ils méritaient certainement une mention.

189

LIVRE III

APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DE LA LUMIÈRE

CHAPITRE PREMIER

LES MIROIRS ET LES INSTRUMENTS DE RÉFLEXION

§ I — Miroirs des anciens, de métal poli — Glaces de verre étamé — Les Réflecteurs — Les Espions

L'usage des miroirs est fort ancien. Sans remonter au temps de Moïse, et au passage de l'*Exode* où il est question des miroirs des femmes, qui se tenaient à l'entrée du tabernacle, on trouve des miroirs métalliques chez les anciens Égyptiens (fig. 136). En Grèce, à Rome, on ornait les murs des appartements de plaques polies et réfléchissantes d'acier, d'argent, d'or, d'obsidienne, de pierre spéculaire; il paraît même, si l'on en juge par divers passages de Pline et d'Aristote, que les miroirs

de verre doublé d'une feuille de métal poli n'étaient point inconnus.

Mais il faut arriver jusqu'au xve siècle pour voir substituer aux miroirs de métal poli les glaces de verre étamé. On sait aujourd'hui combien ces objets sont répandus et combien l'usage en est devenu général, soit pour la toilette, soit pour l'ornementation intérieure et même extérieure. Si les miroirs et les glaces



FIG. 136. — Miroirs des anciens Égyptiens.

de verre ont l'inconvénient d'une grande fragilité, ils ont sur les mêmes objets métalliques une supériorité immense, celle d'être à peu près inaltérables, tandis que les premiers s'oxydent, se ternissent et exigent un entretien coûteux.

Aujourd'hui, les manufactures de glaces fournissent des verres d'une dimension énorme et d'une perfection de polissage qui ne le cède en rien à la beauté de la substance transparente elle-même. Plus cette substance est blanche ou plutôt incolore, plus la glace est parfaite, parce qu'alors les rayons lumineux,

qui ont à traverser deux fois son épaisseur pour revenir à l'œil, après s'être réfléchis sur la surface polie de l'étamage, ne changent point de teinte et sont très-peu affaiblis par ce double passage. Un mot sur la surface réfléchissante des miroirs *étamés* ou glaces, surface qui n'est pas le verre, comme on sait, mais une mince feuille d'un amalgame d'étain, qu'on applique



FIG. 137. — Miroir de Venise.

sur la face postérieure de la glace. Voici comment se fait cette opération. Sur une table de pierre bien aplanie, entourée de rigoles, on étale la feuille d'étain, qu'on recouvre d'un bain de mercure. La glace, bien nettoyée, est glissée alors sur la couche de mercure, de manière à chasser l'excès de métal liquide ; puis on détermine, à l'aide de poids, l'adhérence du verre avec la combinaison des deux lames métalliques amalgamées.

L'étamage par le mercure est pernicieux pour la santé des

ouvriers qui exécutent ce travail ; on a essayé d'y substituer l'argenture, qu'on produit en versant sur la surface de la glace un composé de nitrate d'argent, d'ammoniaque et d'acide



FIG. 138. — Miroir extérieur, ou espion.

tartrique. L'argent a, comme l'amalgame d'étain, un pouvoir réfléchissant considérable, mais la teinte des images est légèrement jaunâtre.

On emploie beaucoup, en Belgique et dans d'autres pays du Nord, des miroirs qu'on place extérieurement aux fenêtres des appartements, et qui, mobiles autour d'une charnière, se disposent au gré de chacun, de manière à renvoyer à l'intérieur l'image de ce qui se passe en dehors. Ces miroirs, qui servent

aussi aux marchands pour surveiller, de l'intérieur des magasins, leurs étalages, sont connus sous le nom d'*espions*.

De grands miroirs étamés ou métalliques servent aussi à renvoyer la lumière du ciel à l'intérieur d'un appartement, qui, sans cela, resterait obscur. On emploie fréquemment ces réflecteurs dans les rues étroites et sombres des grandes villes.

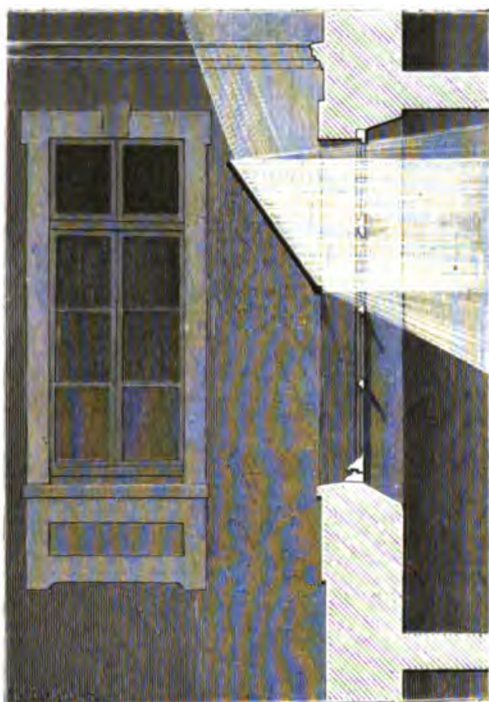


Fig. 139. — Réflecteur.

Avant de décrire les instruments scientifiques fondés sur le phénomène de la réflexion à la surface des miroirs plans, mentionnons une application intéressante et facile des lois de la réflexion. Elle a pour but la mesure des hauteurs verticales des objets : arbres, maisons, édifices, etc. On place sur le sol, dans une position bien horizontale, un petit miroir plan, entre l'objet à mesurer et l'œil. Puis on s'éloigne dans la direction de la ligne qui joint le pied de l'objet au miroir, jusqu'à ce qu'on aperçoive sur ce dernier l'image A′ du sommet A. A ce moment, il est facile

de comprendre que le rapport de la hauteur de l'œil au-dessus du plan en *b* avec la hauteur du sommet A de l'arbre, est précisément celui de la distance horizontale *bO* avec la distance horizontale du pied de l'arbre en O. Un calcul facile donne donc la hauteur cherchée.

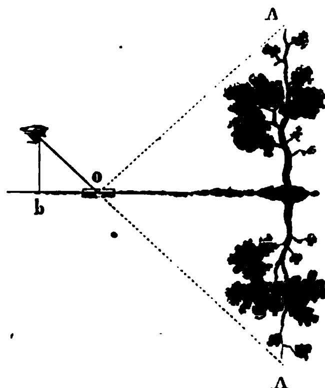


FIG. 140. — Mesure de la hauteur verticale d'un objet.

Nous avons décrit, dans les *Phénomènes de la physique*, diverses applications ingénieuses, amusantes ou utiles, de la réflexion sur les miroirs plans combinés entre eux de plusieurs manières : de ce genre sont la *lunette* et le *miroir magiques*, le *polémoscope*, le *kaléidoscope*; nous renverrons donc le lecteur à cet ouvrage.

§ II — Le Sextant

On appelait autrefois *octant* ou *quartier de réflexion*, l'instrument que nous allons décrire, et qui sert aux marins à prendre les hauteurs des astres ou les distances angulaires de la lune et des étoiles entre elles.

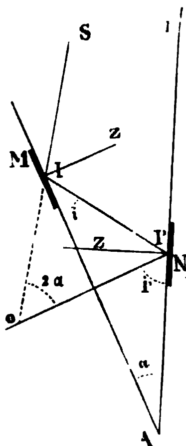


FIG. 141. — Principe théorique du sextant.

L'invention en est due à Hadley (1731); mais plusieurs savants, entre autres Newton, Hooke, Thomas Godfrey de Philadelphie, Harris, ont eu l'idée d'un instrument semblable, fondé sur le même principe. Hadley est toutefois le premier qui l'ait fait construire et qui en ait démontré la grande utilité pratique.

Le sextant est une application d'un principe fort simple de géométrie et de physique, qui est lui-même une conséquence immédiate des lois de la réflexion des rayons lumineux. En voici l'énoncé :

Quand un rayon de lumière a subi, pour arriver à l'œil, deux réflexions successives sur deux miroirs plans, l'angle de déviation de ce rayon est rigoureusement double de l'angle des deux miroirs.

Soit SI (fig. 141) un rayon lumineux venant d'une source de lumière, d'une étoile par exemple; il tombe en I sur le miroir M, s'y réfléchit, suit la direction II', et tombe sur un second miroir N; là il se réfléchit une seconde fois, suit la nouvelle direction I'O, et va tomber dans l'œil. L'angle SOI', formé par le rayon incident et le second rayon réfléchi, est le double de l'angle α que font entre eux les deux miroirs [1].

Voici maintenant la description du sextant, tel qu'on le construit aujourd'hui.

Il se compose d'un secteur circulaire dont l'arc, divisé avec soin, mesure environ 60° (de là son nom de *sextant;* autrefois il ne portait que 45°, ou le huitième de la circonférence, d'où son nom d'*octant*) : celui que représente la figure 142 porte 85°. L'arc, découpé sur une plaque de métal assez épaisse, est solidement relié au centre du secteur, sur lequel peut tourner une plate-forme munie d'une alidade mobile, portant elle-même un vernier V, qui permet de lire les fractions de degré sur le limbe : *l* est une petite loupe servant à ce dernier usage. Un miroir étamé M est fixé normalement au centre du secteur et dans le prolongement de la ligne du zéro de l'alidade mobile ou du vernier. Il est donc mobile avec cette alidade. Un second miroir fixe *m'* est porté sur l'un des côtés du secteur dans une direction exactement parallèle au rayon qui aboutit au zéro des divisions de l'arc : ce second miroir n'est étamé que sur sa moitié inférieure, il est transparent sur l'autre moitié.

1. La démonstration de cette proposition est des plus simples : l'angle en O, en effet, est égal à la différence des angles SII' et II'O, c'est-à-dire à $2(90°-i)-2(90°-i')=2(i'-i)$. D'autre part, l'angle α est égal à la différence des angles II'B et I'IA, c'est-à-dire $= i'-i$. L'angle des deux miroirs est donc moitié de l'angle de déviation.

Une lunette L fixée au rayon opposé du secteur permet de voir à son foyer, par transparence, un point situé dans la direction LS′, et par réflexion un autre point lumineux doublement réfléchi en I sur le premier miroir, en I′ sur le second. Quand la coïncidence de ces deux images a lieu, il est clair que l'angle des rayons SI, S′I′, est double de l'angle des deux

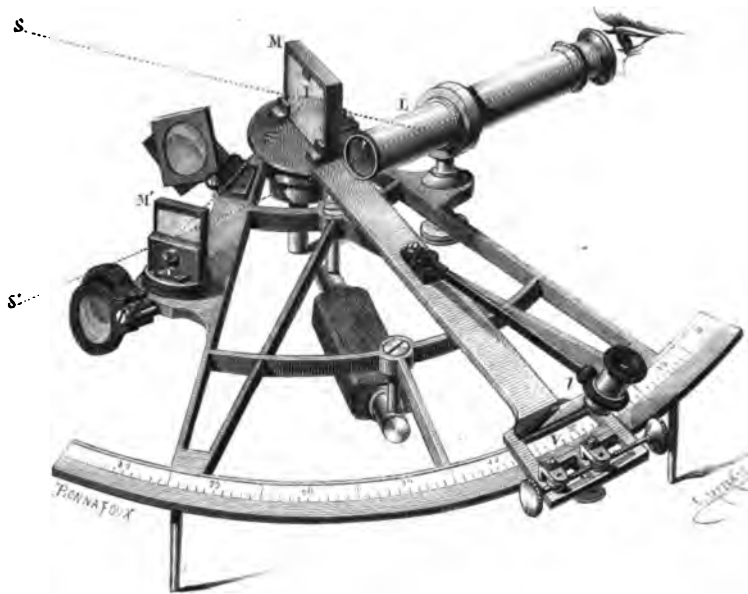


Fig. 142. — Le sextant.

miroirs d'après le principe posé plus haut. Or, l'angle des deux miroirs est précisément alors celui que fait l'alidade mobile avec le zéro du sextant.

On va comprendre maintenant avec facilité comment on se sert de l'instrument.

L'observateur le prend par sa poignée de la main gauche; puis, mettant l'œil à l'oculaire de la lunette, il vise l'un des objets, une étoile par exemple, à travers la partie non étamée du petit miroir. Il fait pivoter alors le sextant autour de la ligne de visée jusqu'à ce que l'autre étoile soit dans le plan du secteur. Alors, faisant tourner l'alidade et le grand miroir, il amène l'image de la seconde étoile, après deux réflexions successives, en coïnci-

dence avec celle de la première, au centre du champ de la lunette.

Quand on veut mesurer la distance angulaire d'une étoile à la lune, c'est l'étoile qu'on vise directement, et l'on amène l'image du bord du disque lumineux en contact avec l'image de l'étoile. S'il s'agit de la distance du soleil à la lune, c'est l'image



FIG. 143. — Officier de marine observant avec le sextant.

du soleil qu'on amène au contact de l'image lunaire ; mais alors on emploie des verres colorés placés en avant du grand miroir pour affaiblir l'intensité des rayons du soleil.

Enfin, si la distance angulaire qu'on veut mesurer est celle d'un astre au-dessus de l'horizon, ce qu'on nomme sa hauteur, on tient le sextant verticalement, de façon que l'astre soit dans son plan, et l'on vise directement avec la lunette l'horizon formé par la surface même de la mer. Si cet horizon manque, on est obligé d'employer un horizon artificiel, soit un bain de mercure, soit une glace polie placée horizontalement à l'aide de trois vis calantes et d'un niveau.

§ III — Les Goniomètres

Il existe, comme on sait, dans la nature un grand nombre de corps qui ont une forme géométrique définie, le plus souvent terminés par des faces planes et polies diversement assemblées. Ce sont les cristaux. Les minéralogistes qui trouvent les cristaux tout formés dans les roches, les chimistes qui les obtiennent par divers procédés, ont un égal besoin, pour les définir, de connaître avec précision les angles des faces d'un même cristal. Ils y parviennent à l'aide d'instruments qu'on nomme *goniomètres* (de γωνια, angle, et μέτρον, mesure), et qui sont généralement basés sur le même principe, celui des lois de la réflexion des rayons lumineux. Le plus souvent, en effet, les faces des cristaux ont un pouvoir réfléchissant assez grand pour qu'on puisse considérer et employer chacune d'elles comme un miroir plan.

Les goniomètres de réflexion sont assez nombreux. Nous nous bornerons à décrire deux des plus employés, le *goniomètre de Wollaston* et le *goniomètre de Babinet*, inventés par chacun de ces deux célèbres physiciens.

Le *goniomètre de Wollaston* se compose des pièces suivantes :

1° D est un limbe vertical divisé en degrés sur sa tranche et mobile sur un axe horizontal, qu'on fait tourner à volonté au moyen d'une virole G. Un vernier V, fixé sur le montant de l'instrument, sert à indiquer l'angle dont on a fait tourner le limbe.

2° L'axe du limbe est creux ; il est traversé par une tige qui peut tourner sur elle-même, indépendamment du limbe, à l'aide d'une virole A. Cette tige supporte une pièce articulée, qui elle-même porte une plaque métallique, susceptible de tourner en divers sens au moyen d'un bouton et des articulations. C'est sur cette plaque qu'on place le cristal dont il s'agit de mesurer un des angles.

Voici comment on procède à cette mesure.

On fait choix de deux mires horizontales parallèles, par exemple de l'arête d'un toit de maison et d'un barreau d'une croisée du rez-de-chaussée; ou encore on prend pour mire supérieure l'arête supérieure d'une fenêtre ouverte dont la ligne sombre se détache sur le ciel, et pour arête inférieure le rebord d'une table ou celui d'une feuille de papier posée sur cette table.

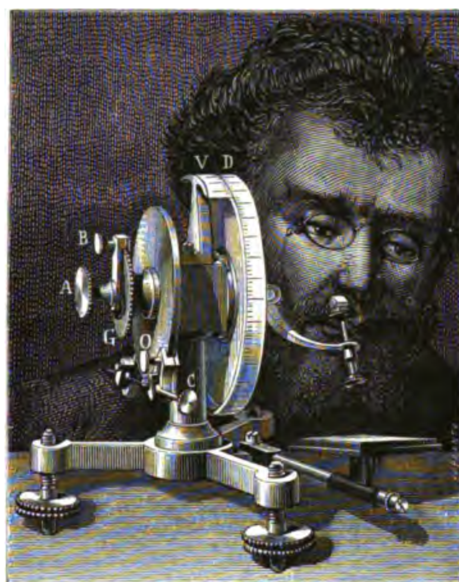


FIG. 144. — Goniomètre à réflexion de Wollaston.

Cela fait, on place le goniomètre dans une position telle que le limbe en soit bien vertical (un niveau à bulle d'air et les vis calantes du pied permettent d'obtenir ce résultat), et en même temps dans une direction perpendiculaire aux mires choisies. Alors on dispose le cristal sur la plaque de l'instrument en l'y maintenant avec de la cire; et il importe de le placer de façon que l'arête de l'angle à mesurer soit elle-même perpendiculaire au limbe ou parallèle à l'axe de rotation. On se sert pour cela des images des deux mires obtenues par réflexion sur les deux faces, images qui, pour chacune des faces, doivent être bien parallèles entre elles.

Une fois ces dispositions préliminaires prises, on place le zéro du limbe en coïncidence avec le zéro du vernier. Faisant tourner alors le cristal avec la virole A, on amène l'image de la mire supérieure en coïncidence avec la mire inférieure vue directement. Puis on tourne le limbe lui-même, et par conséquent le cristal, jusqu'à ce qu'on obtienne la même coïncidence, mais cette fois sur la seconde face du cristal. Ce dernier a pris les deux positions qu'indique la figure, et chaque face a tourné de l'angle α (fig. 145).

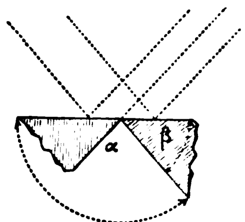
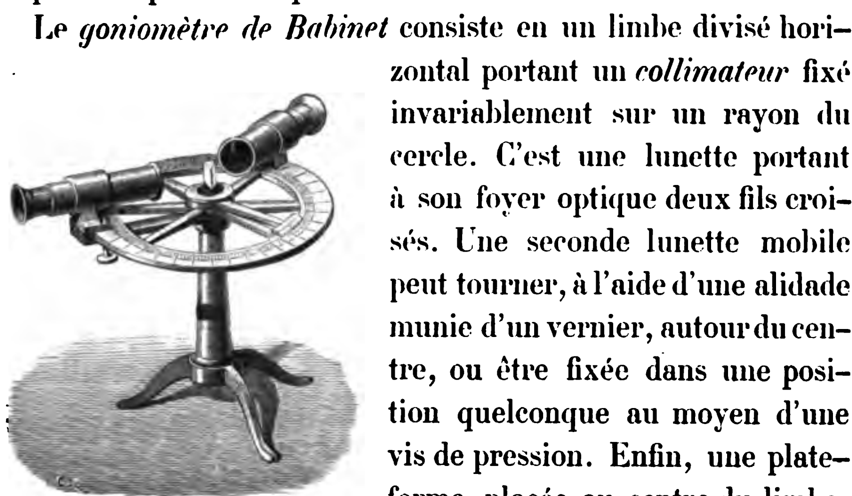


Fig. 145. — Principe géométrique du goniomètre; angle de rotation du cristal.

La lecture de l'angle de rotation du limbe donne en degrés et fractions de degré, non pas l'angle β du cristal lui-même, mais son supplément géométrique, α, d'où l'on déduit le premier par un simple calcul.

Le *goniomètre de Babinet* consiste en un limbe divisé horizontal portant un *collimateur* fixé invariablement sur un rayon du cercle. C'est une lunette portant à son foyer optique deux fils croisés. Une seconde lunette mobile peut tourner, à l'aide d'une alidade munie d'un vernier, autour du centre, ou être fixée dans une position quelconque au moyen d'une vis de pression. Enfin, une plate-forme, placée au centre du limbe, peut tourner autour de son axe vertical, au moyen d'une alidade, munie elle-même d'un vernier qui sert à mesurer l'angle de rotation. C'est sur cette plate-forme que l'on pose le cristal, en ayant soin de donner à l'arête de l'angle à mesurer une position parfaitement verticale.


Fig. 146. — Goniomètre à réflexion de Babinet.

Voyons maintenant comment on procède à la mesure de l'angle.

On fixe d'abord la lunette mobile en une position qui fait un angle quelconque avec celle du collimateur; on amène le zéro du vernier de l'alidade vis-à-vis du zéro du limbe, et l'on tourne le support du cristal jusqu'à ce qu'on voie dans la lunette le fil micrométrique placé à son foyer coïncider avec l'image du fil du collimateur vue par réflexion sur l'une des faces du cristal.

A ce moment, on tourne de nouveau le cristal, mais cette fois à l'aide de l'alidade elle-même, jusqu'à ce que la même coïncidence ait lieu avec l'image réfléchie vue sur l'autre face du cristal.

L'angle de rotation, mesuré au vernier de l'alidade, est celui des deux normales aux faces réfléchissantes; de sorte qu'en calculant le supplément de cet angle, on aura celui des deux faces du cristal.

La figure 146 représente un goniomètre de Babinet monté sur un pied à genou; mais on en fabrique de plus petits et de plus simples qu'on peut tenir à la main à l'aide d'une poignée.

Le même instrument peut servir dans les recherches d'optique toutes les fois qu'on emploie des prismes dont il est nécessaire de connaître l'angle avec exactitude.

§ IV — Les Héliostats

Dans un grand nombre d'expériences d'optique, il est nécessaire de projeter, suivant une direction constante, un faisceau de lumière solaire, ce que le mouvement diurne du soleil ne permet pas d'obtenir directement dans les expériences de quelque durée. Si le faisceau est d'abord reçu sur un miroir plan d'où il est renvoyé, par réflexion, vers le point ou vers l'objet qu'il s'agit d'éclairer, il faut changer progressivement l'inclinaison du miroir pour conserver au faisceau réfléchi sa direction constante.

On y parvient au moyen des *porte-lumière*, appareils que

nous avons eu l'occasion de décrire quand il a été question du *microscope solaire* (*Phénom. de la physique*, p. 232 et 233), et qui consistent en un miroir susceptible de tourner à volonté autour de deux axes, l'un horizontal, l'autre vertical, si le faisceau réfléchi doit avoir lui-même une direction horizontale. Mais l'intervention de l'observateur est toujours nécessaire pour modifier dans un sens convenable l'orientation du miroir.

Les *héliostats* sont des appareils destinés à rendre cette inter-

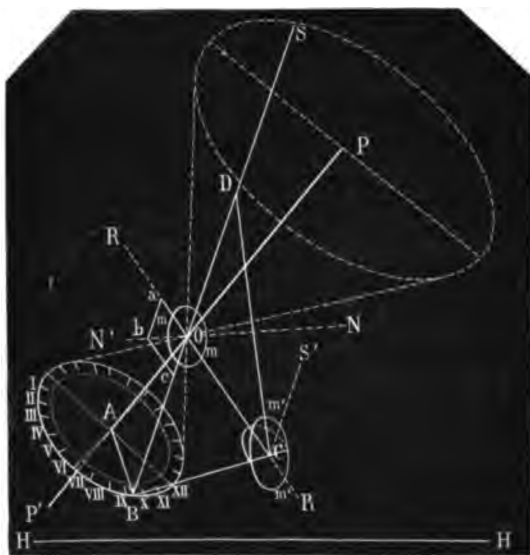


FIG. 147. — Principe géométrique des divers systèmes d'héliostats.

vention inutile : le miroir qui en constitue la pièce réfléchissante est mis en mouvement d'une façon continue par une horloge, et un mécanisme approprié le maintient constamment dans une inclinaison telle que les rayons solaires, réfléchis à sa surface, suivent une direction constante, malgré le mouvement diurne de l'astre.

Il y a des héliostats de constructions variées, nous nous bornerons à mentionner ceux qui portent les noms de Silbermann et de Foucault, leurs inventeurs. Mais, auparavant, nous ferons connaître le principe commun à tous, et sans lequel on ne

pourrait comprendre leurs dispositions ni le jeu de leur mécanisme.

La ligne PP′ représentant l'axe du monde, la ligne de direction invariable autour de laquelle a lieu le mouvement diurne des étoiles et du soleil, le cercle S sera la route apparente parcourue par ce dernier astre en un jour, l'angle SOP étant la déclinaison du soleil à l'époque considérée. En A, est un cadran équatorial sur lequel l'ombre du style AO marque à chaque instant l'heure du jour. La ligne SOB indique donc le chemin suivi par un faisceau de rayons solaires, et, si l'on conçoit que la ligne OB tourne autour du point O en suivant constamment l'extrémité B du rayon AB, elle sera toute la journée la route de la lumière incidente.

Soit RR la direction suivant laquelle on veut que les rayons solaires soient constamment réfléchis, la bissectrice NN′ de l'angle SOR sera la normale au point d'incidence, ce qui détermine la position que le miroir *mm* doit occuper au moment supposé, pour que la réflexion se fasse suivant la direction voulue.

Toute la question est donc de maintenir le miroir dans une position relative toujours la même, par rapport à la direction constante des rayons réfléchis et à la direction variable des rayons solaires incidents. On y arrive de plusieurs manières.

1° On place au-dessous du cadran équatorial une horloge qui fait mouvoir une aiguille BA et lui fait décrire un cercle entier en vingt-quatre heures. Cette aiguille se trouve donc sans cesse dans la direction qu'occuperait précisément l'ombre du style. A son extrémité est fixée une tige BO à laquelle on donne une inclinaison, sur le cadran, égale à la déclinaison du soleil pour le jour de l'observation. C'est là une première condition à laquelle satisfont pareillement les divers systèmes d'héliostats.

2° La tige OB porte le miroir; elle est liée à un parallélogramme articulé O*abc*, dont la diagonale O*b* coïncide avec la bissectrice de l'angle SOR, c'est-à-dire avec la normale au point

d'incidence, le côté fixe Oa du parallélogramme étant dirigé suivant la direction OR qu'on veut donner au faisceau réfléchi. Tel est le système d'héliostat imaginé par J. T. Silbermann, et qu'on voit réalisé dans la figure 148.

3° Soit maintenant OC une tige de longueur constante pouvant prendre autour du point O une position quelconque, celle qu'on

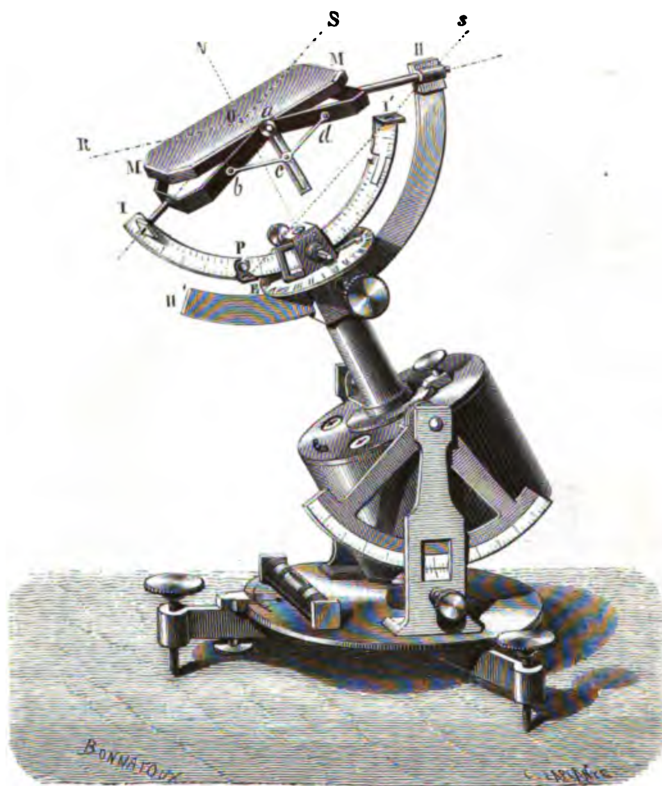


Fig. 148. — Héliostat de J. T. Silbermann.

veut donner au rayon réfléchi. Cette tige est creuse et porte une fourchette à laquelle est fixé le miroir $m'm'$, qui peut aussi tourner autour de OR et autour de BC. Une autre tige CD, disposée dans le plan du miroir, est articulée à un anneau en D, à l'extrémité d'une tige OD égale à OC. Un rayon S'C qui tombera sur le miroir parallèlement à SO sera réfléchi suivant CR. Telle est la disposition de l'héliostat de Gambey,

4° Le miroir est supporté en C par une tige verticale autour de laquelle il peut prendre toutes les directions possibles. Il est dirigé par une autre tige CB normale à sa surface et articulée en B à un anneau fixé sur OB à une distance OB = OC. Dans son plan, une troisième tige CD est percée d'une rainure dans laquelle peut glisser le prolongement OD de OB. Les deux



Fig. 149. — Héliostat de Léon Foucault.

triangles OCD et OBC sont toujours isocèles, de sorte que la normale CB au miroir est parallèle à ON, bissectrice de l'angle des rayons incidents et réfléchis. C'est le principe de l'héliostat de Léon Foucault.

Ces principes posés, il est aisé de comprendre le mécanisme des trois systèmes d'héliostats de Gambey, de Silbermann et de Foucault, dont les deux derniers sont reproduits par les figures 148 et 149.

§ V — Le Sidérostat

Un grave inconvénient des instruments employés dans les observatoires aux recherches d'astronomie physique, c'est que l'observateur doit se déplacer avec l'oculaire de la lunette, selon le point du ciel qu'il étudie, et avec le mouvement de rotation diurne qui entraîne ce point. De là, pour lui, des positions fort incommodes, gênantes et fatigantes, et, en somme, nuisibles à l'étude du phénomène observé.

Quand il s'agit d'observations à la lunette méridienne ou au théodolite, l'emploi d'un prisme rectangulaire, à l'intérieur duquel les rayons lumineux subissent la réflexion totale, permet de renvoyer l'image dans une direction constante : on nomme *lunette brisée* l'instrument où cette modification est apportée. Mais c'est une solution qui n'est point applicable aux équatoriaux, instruments dont l'axe se déplace uniformément autour de l'axe du monde, et suit l'astre observé à mesure que l'entraîne le mouvement diurne.

C'est dans le but de remédier à cette lacune et d'éviter les inconvénients signalés plus haut, que Léon Foucault a imaginé l'instrument auquel il a donné le nom de *sidérostat*. Ce n'est autre chose qu'une lunette astronomique, dont l'axe optique est invariablement fixé dans une position horizontale, au devant de laquelle l'image du point du ciel qu'il s'agit d'observer est renvoyée par un miroir mû par un mouvement d'horlogerie, et susceptible de prendre à chaque instant la position variable qu'exige le mouvement diurne. Tout le ciel peut donc ainsi, à la volonté de l'observateur, défiler devant la lunette, qui reste immobile, et celui-ci, sans se déranger, conserve l'œil à l'oculaire de l'instrument. Le sidérostat est donc en réalité une espèce d'héliostat où la direction du rayon réfléchi reste constante et horizontale.

La figure 150 permet d'en saisir nettement la disposition.

Le miroir peut tourner autour d'un axe horizontal porté lui-même par deux montants verticaux tournant à volonté sur une couronne de galets autour d'un axe vertical. Il est soutenu par une tige normale à sa surface, qui glisse dans un

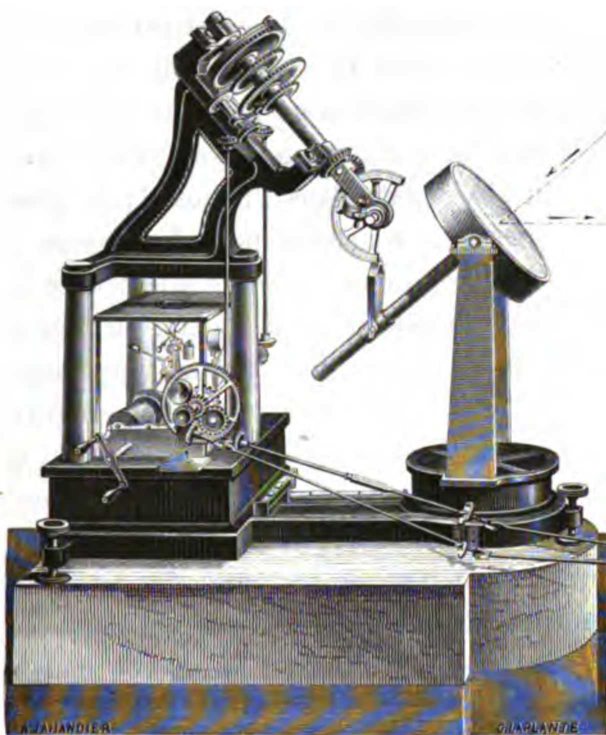


Fig. 150. — Le sidérostat.

anneau embrassé par une fourchette dont l'axe donne la direction des rayons incidents de l'astre observé. Cette fourchette est articulée, à son autre extrémité, au bout d'un axe qui est parallèle à l'axe du monde, et qui tourne sur lui-même d'un mouvement uniforme avec la vitesse angulaire du mouvement diurne.

Un cercle divisé permet de fixer la direction de l'axe de la

fourchette, de manière que l'angle qu'elle fait avec l'axe du monde soit égal à la distance polaire de l'astre. L'angle horaire de ce dernier étant donné pour le moment où l'observateur doit commencer, on dispose l'instrument de manière que les rayons de l'astre viennent tomber dans le plan qui passe par l'astre et par l'axe de la lunette, et le mouvement l'y laisse ensuite pendant tout le temps de l'observation.

Une des grandes difficultés de la construction du sidérostat, c'était le miroir plan dont la surface doit être travaillée de manière à offrir une perfection géométrique aussi grande que possible. C'est en cela que consiste la différence essentielle de l'héliostat et du sidérostat. Dans l'héliostat, le principal est d'obtenir une direction constante pour les rayons réfléchis; comme c'est la lumière qu'on étudie, non la source lumineuse elle-même, il importe peu que celle-ci soit ou non déformée. Le sidérostat, au contraire, doit donner une image exacte, identique, du ciel lui-même, des astres, de leur figure, de leur mouvement. Ce problème difficile de la réalisation d'un plan optique a été résolu par Léon Foucault à l'aide d'une méthode dont cet habile et regrettable physicien a laissé tous les éléments entre les mains d'un de ses amis, M. Ad. Martin.

Voici comment M. Wolf apprécie les avantages du nouvel instrument qui malheureusement, à l'heure où nous écrivons, n'a pas encore reçu la consécration d'une expérience suffisamment prolongée : « Il n'est point d'observateur, dit-il, qui n'ait eu à lutter contre les difficultés que présente l'adaptation à la lunette d'un équatorial, d'un grand spectroscope, des chambres photographiques, des appareils de projection ou de recherches photométriques. Toutes ces difficultés disparaissent par l'emploi du sidérostat. Les instruments des cabinets de physique, quels que soient leur poids, leur volume et leur forme, viennent se placer devant le foyer de la lunette comme devant le porte-lumière de la chambre obscure, et l'astronome étudie la lumière de tous les astres dans les mêmes conditions où le physicien

a étudié la lumière solaire. Par là bien des expériences, aujourd'hui presque inabordables, peuvent se réaliser aisément, et particulièrement celles qui exigent une stabilité parfaite de l'instrument de mesure : telles sont les déterminations des positions absolues des raies spectrales et des déplacements de ces raies, les mesures photométriques, etc.

» Le miroir du sidérostat, essayé sur le ciel avec l'excellente lunette de Cauche, de 16 centimètres d'ouverture, qui appartient à l'Observatoire, et des grossissements de 100 à 300 fois, ne produit aucune déformation du faisceau provenant d'une étoile sous une incidence de plus de 45°. »

La perte de la lumière occasionnée par la réflexion est faible; d'après les expériences de Foucault, elle ne s'élève pas, pour l'argent poli des miroirs, à plus des $\frac{9}{100}$ de la lumière incidente. D'ailleurs, le poli dure très-longtemps, et, comme la réargenture est facile, on peut remettre en état le miroir dès que la surface en est altérée pour une cause quelconque [1].

Espérons que cet instrument nouveau, entre les mains d'observateurs savants et habiles, justifiera les espérances qu'il a fait concevoir, par les découvertes et les travaux astronomiques qu'il rendra possibles.

1. Le sidérostat a été construit par M. Eichens, sous la direction de MM. Wolf et A. Martin.

CHAPITRE II

LES PHARES

---

§ 1 — Signaux maritimes — Premiers phares de réflexion ou catoptriques

Les phares n'étaient pas inconnus des anciens, témoin le fanal allumé sur une haute tour, en avant du port d'Alexandrie, et qui existait encore, paraît-il, au XII[e] siècle. L'îlot sur lequel cette tour était bâtie donna son nom à l'édifice, qui le transmit lui-même à tous les feux allumés sur les côtes pour la protection de la navigation. Les phares, encore peu nombreux au moyen âge, se sont multipliés à mesure que la navigation s'est elle-même étendue, et aujourd'hui ils éclairent de leurs feux variés toutes les côtes fréquentées par les navires de toutes les nations.

Ce n'est guère que depuis un siècle qu'on a cherché à mettre à profit les lois de réflexion et de réfraction de la lumière pour accroître la portée et l'éclat des lumières des phares. C'étaient autrefois de simples feux allumés au sommet d'une tour, exposés à toutes les intempéries. On commença par y substituer des lampes protégées par des vitres; puis on songea à renvoyer au loin l'éclat lumineux à l'aide de réflecteurs de métal poli. On créa ainsi les appareils connus sous le nom de *phares de réflexion* ou

phares catoptriques. Ils n'eurent pas d'abord grand succès; les lampes étaient défectueuses, et les réflecteurs, de forme sphérique, ne recevaient qu'une petite fraction des rayons de lumière, ou ne les projetaient pas dans une direction convenable. « En 1782, on avait établi ce genre d'éclairage à Cordouan; mais, quoique ce phare ne comptât pas moins de quatre-vingts lampes accompagnées chacune d'un réflecteur, il répandait une lueur si faible, que les navigateurs demandèrent instamment qu'on en revînt au système barbare du moyen âge. » (*Les Phares*, par Léon Renard.)

Un ingénieur du siècle dernier, Teulère, substitua aux miroirs sphériques des miroirs de forme parabolique. La lumière d'une lampe placée au foyer d'un miroir de ce genre est renvoyée en un faisceau cylindrique ou en rayons parallèles, dont l'intensité ne diminue point, par conséquent, avec la distance. Le seul affaiblissement de lumière est produit par l'épaisseur des couches d'air ou des brumes atmosphériques. Aux lampes ordinaires, le même inventeur substitua aussi les lampes à double courant d'air qu'Argant venait d'inventer; plus tard, les lampes Carcel, où l'huile est amenée au bec d'une manière continue par un mouvement d'horlogerie, augmentèrent encore l'éclat et la constance des feux que l'appareil réflecteur projetait à l'horizon. Teulère faisait d'abord tourner ses miroirs autour d'une lampe dont le bec restait dans l'axe de rotation, de sorte que la lumière était successivement projetée sur tous les points de l'horizon et successivement éclipsée. Il est donc aussi l'inventeur des *feux à éclipses*. Un phare de ce genre fut établi à Dieppe par Borda, en 1784, et un autre à la tour de Cordouan, six ans plus tard, en 1790.

Les appareils catoptriques sont généralement formés de groupes de miroirs paraboliques dont chacun possède une lampe à son foyer. L'ensemble est mû par un mouvement d'horlogerie. Tel est celui que représente la figure 151. Il comprend trois systèmes de réflecteurs groupés eux-mêmes par trois, de sorte qu'une rotation complète donne, pour chaque point de l'horizon,

trois illuminations et trois éclipses. On peut, en variant la vitesse du mouvement, obtenir des éclipses plus ou moins rapprochées, et distinguer ainsi les uns des autres les phares établis sur des points différents de la côte.

La portée des miroirs paraboliques est considérable. Des expériences dues à Biot et à Arago prouvent qu'un miroir de $0^m,81$ d'ouverture donne une lumière visible dans les lunettes à une distance de quarante lieues. Néanmoins la perte de lumière due à la réflexion ou à l'absorption des rayons à la surface du métal est d'au moins la moitié des rayons incidents. De plus, la surface polie des miroirs est rapidement altérée par l'action des vapeurs salines que l'air contient dans le voisinage de la mer. Ces inconvénients ont fait peu à peu abandonner les phares catoptriques, au moins pour les phares du premier ordre ou de longue durée : en France, on ne s'en sert plus que pour l'éclairage des passes étroites, des chenaux, ou comme supplément d'un feu dans une direction où la portée de celui-ci est insuffisante.



Fig. 151. — Phare catoptrique.

Mais cet abandon n'a été possible qu'après l'invention des appareils lenticulaires, où la réfraction est, totalement ou partiellement, substituée à la réflexion pour la projection des feux : c'est ce qu'on nomme les *phares dioptriques*. Cette invention, due à l'illustre Fresnel, date seulement de l'année 1822.

§ II — Phares de réfraction ou dioptriques — Appareils lenticulaires de Fresnel

Nous avons vu déjà, en parlant des verres ardents, que Buffon avait imaginé de construire des lentilles formées de portions concentriques d'une même lentille à grande ouverture, et de diminuer ainsi l'épaisseur du verre, et par suite, la quantité des rayons de chaleur absorbés par leur passage dans le milieu réfringent. Ces *lentilles à échelons* n'avaient pas d'ailleurs été exécutées sur une grande échelle, à cause des difficultés de la fabrication, du coulage, de la taille et du polissage d'une masse de verre un peu considérable.

Fresnel, qu'Arago avait fait adjoindre à la commission nommée en 1819 pour le perfectionnement des phares, eut la même idée que Buffon; mais il y apporta un double perfectionnement qu'on peut considérer comme capital. En premier lieu, il rendit possible et pratique la construction de lentilles à échelons de grande ouverture, en les formant de plusieurs morceaux qu'il est aisé de travailler séparément, et en unissant toutes les parties de la lentille à l'aide d'un mastic de colle de poisson qui permet de les faire adhérer solidement par leurs bords. En second lieu, il profita de ce mode de fabrication pour apporter à la forme même des surfaces réfringentes un perfectionnement auquel Buffon n'avait pas songé. Après avoir fait observer que si notre grand naturaliste n'avait pu faire exécuter une lentille à échelons de trois pieds de diamètre, c'est qu'il n'avait pas pensé à la faire de plusieurs morceaux, Fresnel ajoute : « Il n'avait pas fait attention non plus, à ce qu'il paraît, à un grand avantage que présente l'exécution séparée de la surface de chaque anneau, qui est de corriger presque entièrement l'aberration de sphéricité, quand les anneaux sont suffisamment multipliés, en déterminant par le calcul le centre et le rayon de courbure de chacun des arcs générateurs. Car, après avoir conçu d'abord la lentille

terminée par une même surface sphérique, il suppose qu'on déprime celle-ci par échelons, mais de manière que les nouvelles portions de surfaces sphériques soient *concentriques* à la première; ce qui n'est point le véritable moyen de corriger l'aberration de sphéricité. Le calcul apprend que les arcs générateurs des anneaux, non-seulement ne doivent pas avoir le même centre, mais encore que ces différents centres ne sont pas situés

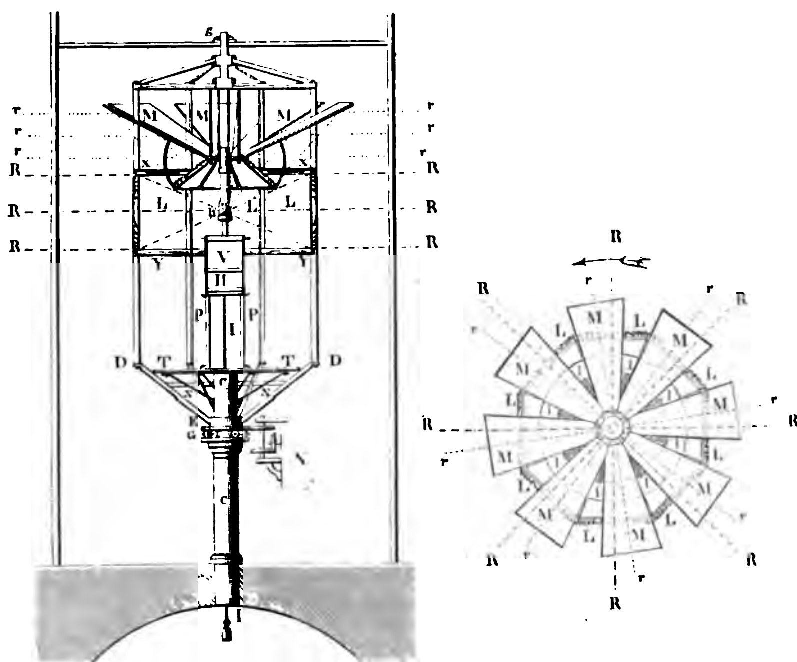


Fig. 152. — Premier appareil lenticulaire de Fresnel : élévation et plan.

sur l'axe de la lentille, et qu'ils s'en éloignent d'autant plus que les arcs auxquels ils appartiennent sont eux-mêmes plus éloignés du centre de la lentille; en sorte que ces arcs, en tournant autour de l'axe, n'engendrent pas des portions de surfaces sphériques concentriques, mais des surfaces du genre de celles que les géomètres appellent *annulaires*. »

Pour utiliser le plus complétement possible les rayons de lumière émanés de la lampe située au foyer commun de toutes les lentilles qui composent un appareil dioptrique, Fresnel imagina

de faire recevoir les rayons supérieurs, qui eussent été perdus, par des lentilles trapézoïdales; celles-ci étaient disposées tout autour de la lampe suivant une inclinaison telle, que les rayons se trouvaient réfléchis horizontalement en *rr*, par des miroirs MM formant éventail, et allaient renforcer les faisceaux R des lentilles verticales.

La figure 152 montre le plan et la coupe d'un appareil lenticulaire, tel que Fresnel le disposa tout d'abord. Depuis, au lieu des lentilles inclinées et de leurs miroirs réflecteurs, il recueillit

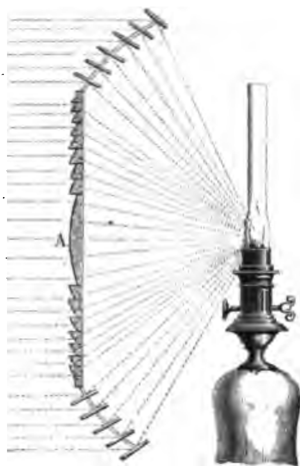


Fig. 153. — Marche des rayons dans un phare catadioptrique de Fresnel, à lentilles et à miroirs inclinés.

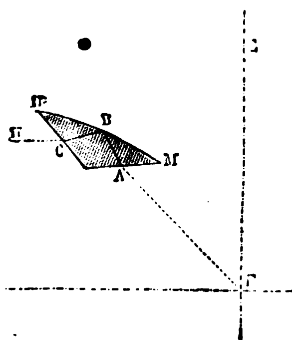


Fig. 154. — Réflexion totale dans les prismes des phares catadioptriques.

les rayons qui ne tombent point sur les lentilles verticales, par des séries de couronnes de miroirs de verre étamé, convenablement inclinées pour que la réflexion se fasse horizontalement; ou encore par des séries de prismes où les rayons lumineux subissent la réflexion totale. Les figures 153 et 154 montrent la marche de ces rayons dans l'un et l'autre système.

Ainsi la réflexion et la réfraction sont également utilisées dans ces appareils, qui portent aussi pour cela le nom de *phares catadioptriques*. Fresnel ne se borna point à ces modifications capitales dans l'éclairage des phares; il en perfectionna les lampes,

avec le concours de F. Arago, y introduisit les systèmes des becs multiples imaginés par Rumford, et combina heureusement le système Carcel, de manière à donner à la lumière le plus possible d'intensité et de régularité, qualités si précieuses dans ce genre d'application.

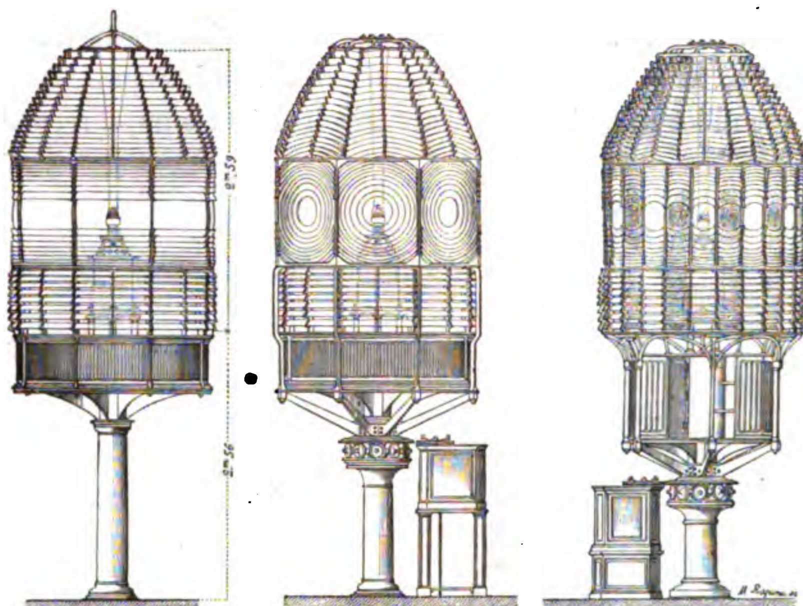


Fig. 155. — Appareil du premier ordre à feu fixe et à lumière blanche.

Fig. 156. — Appareil du premier ordre à éclipses de minute en minute.

Fig. 157. — Appareil à feux blancs et rouges et à éclipses de 20 en 20 secondes.

Un mot maintenant sur les moyens employés pour diversifier les feux des phares et pour permettre aux marins de reconnaître les points de la côte en vue desquels ils se trouvent.

Les phares se divisent en feux du premier, du second et du troisième ordre, selon l'intensité de l'éclat et la portée de leur lumière. Les lampes des *phares du premier ordre* ont quatre mèches concentriques ; il y a trois mèches dans les *phares du second ordre* et deux mèches dans les *phares du troisième ordre*. L'éclat varie dans le rapport des nombres 4, 2 et 1, et équivaut à vingt, à dix et à cinq lampes de Carcel. On a même, depuis, dépassé ce résultat.

Voilà pour les intensités. Mais, à intensité égale, on distingue les feux les uns des autres par le nombre des éclipses et la durée des intervalles qui les séparent, et aussi par la couleur de la lumière des éclats. Il y a les *feux fixes*, produits par un appareil lenticulaire de forme cylindrique; puis, les *feux à éclipses*

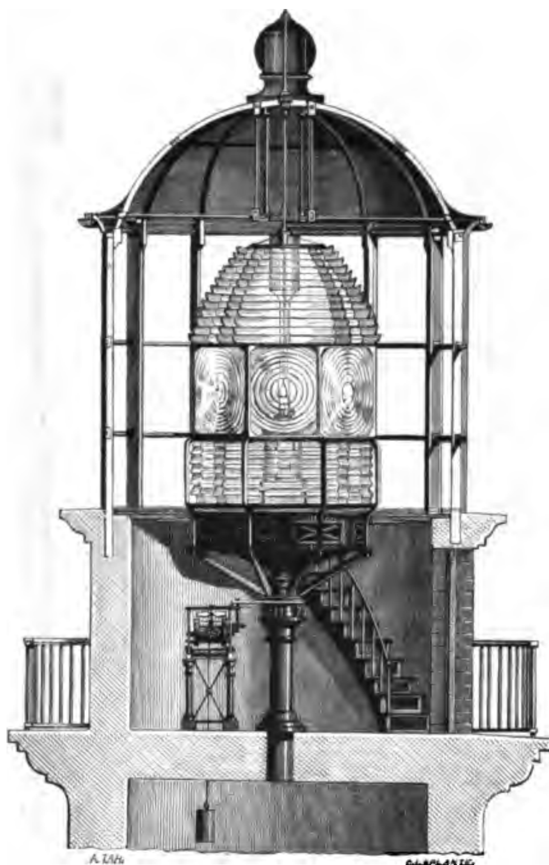


FIG. 158. — Appareil lenticulaire et lanterne d'un phare du premier ordre.

à éclats blancs, rouges ou verts diversement combinés. L'appareil lenticulaire est alors formé d'un tambour octogonal principalement composé de huit lentilles simples à échelons. La rotation plus ou moins rapide du système donne lieu à une succession d'éclats et d'éclipses dont la durée varie. Enfin, à l'aide de glaces colorées interposées au devant des lentilles,

on fait encore varier la couleur des feux. Les figures 155, 156 et 157 montrent comment sont disposés les appareils pour quelques-unes de ces combinaisons. On peut voir en outre, dans les

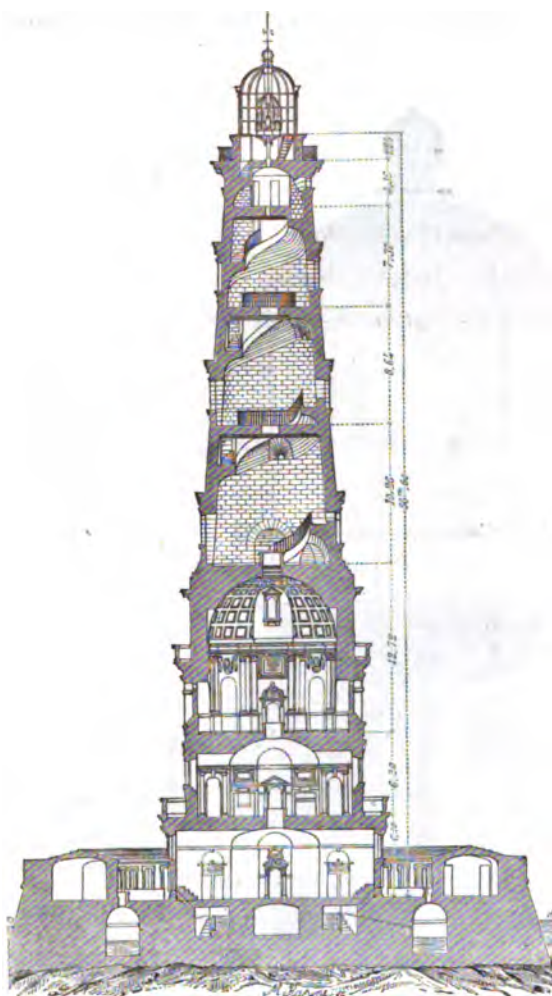


Fig. 159. — Intérieur du phare de Cordouan.



Fig. 160. — Le phare de la Nouvelle-Calédonie.

figures 158, 159 et 160, comment les appareils sont installés dans la lanterne qui couronne la tour du phare, et quelle est la disposition architecturale de l'édifice. Le phare de Cordouan a, comme on voit, un aspect tout à fait monumental, et il est entiè-

rement construit en pierres. Celui de la Nouvelle-Calédonie, tout récemment édifié, est au contraire de tôle et de fonte de fer. Construit à Paris, il a donc pu être transporté tout fabriqué au lieu de sa destination, où il est inauguré depuis huit ans.

Une nouvelle innovation a été introduite, en ces derniers temps, dans l'éclairage des phares. Elle est relative à l'emploi de la lumière électrique, substituée à celle d'une lampe ordinaire, et par conséquent à l'accroissement d'intensité et de portée des feux des phares. Mais l'appareil dioptrique restant le même, nous n'avons point ici à nous occuper de ce système; nous y reviendrons dans le livre consacré aux applications de l'électricité.

CHAPITRE III

LE MICROSCOPE

Un objet excessivement petit, même quand il est fortement éclairé, envoie dans l'œil, à la distance de la vision nette, un faisceau de lumière trop peu intense pour que l'impression sur la rétine produise une image distincte. Il faudrait le rapprocher de l'œil, augmenter ainsi son diamètre apparent; mais alors la réunion des rayons émanés de ses divers points ne se ferait pas sur la rétine et l'image serait confuse.

Le *microscope* est un instrument destiné à venir en aide à la vue, en produisant des images plus ou moins amplifiées des petits objets, que notre œil peut voir alors nettement comme à la distance de la vision distincte.

Il y a deux sortes de *microscopes* : la *loupe*, ou le *microscope simple*, et le *microscope composé*.

Il est bien probable, si cela n'est pas absolument prouvé, que les anciens connaissaient le pouvoir grossissant des masses de verre de forme sphérique. Un passage d'une comédie d'Aristophane montre que les Athéniens connaissaient le moyen d'allumer du feu à l'aide d'un morceau de verre qui concentrait à son foyer les rayons du soleil. Les pierres fines gravées qui nous restent des Romains n'ont pu être travaillées sans

le secours d'instruments grossissants. Ces instruments consistaient-ils en morceaux de verre taillés ou coulés en forme de lentilles, ou n'était-ce que des boules creuses de verre remplies d'eau? Tout au moins, cette dernière supposition est-elle rendue probable par le passage souvent cité des *Questions naturelles* de Sénèque : « Tous les objets vus à travers l'eau, dit-il, semblent plus considérables. Des caractères menus et peu distincts, lus au travers d'un globe de verre plein d'eau, sont plus gros à l'œil et plus nets. » Mais si les anciens ont connu le pouvoir optique des sphères d'eau ou de verre, ou même des lentilles de verre, il ne paraît pas qu'ils aient su en tirer parti ni les construire d'une façon précise. Aucune observation d'histoire naturelle ne nous a été laissée par eux, qui témoigne d'un usage scientifique de la loupe dans l'antiquité.

§ I — La Loupe

Une simple lentille convergente, plan-convexe ou biconvexe, enchâssée dans une monture dont la forme varie avec la destination, tel est le microscope réduit à sa plus grande simplicité. C'est ce qu'on nomme ordinairement une *loupe*.

La figure 161 représente la marche des rayons lumineux dans une loupe. L'objet AB est placé à une distance de la lentille plus petite que la distance focale principale. L'œil, placé au point F de convergence, reçoit ces rayons comme s'ils émanaient des points A'B', c'est-à-dire d'une image virtuelle droite et agrandie de l'objet.

Pour que cette image soit bien nette, il faut que la distance A'F soit égale à celle de la vision distincte pour l'observateur; d'où résulte, pour la position de l'objet, un point déterminé qu'on peut, soit calculer, soit trouver aisément par tâtonnement ou par expérience. Cette position diffère très-peu de celle du foyer principal *f*, d'autant moins que la courbure de la lentille

est plus forte, c'est-à-dire qu'elle est à plus court foyer. Si l'on place l'objet plus loin de la lentille, il arrive bientôt au foyer principal *f*, et l'image, qui a diminué d'amplitude, s'en va à l'infini. Si, au contraire, on rapproche l'objet de la loupe, son image grossit, mais devient confuse.

Grossissement d'une loupe. — Le grossissement, dans les instruments d'optique, dans le cas de la vision nette des images, n'est autre chose que le rapport qui existe entre le diamètre apparent de l'objet et le diamètre apparent de l'image. On

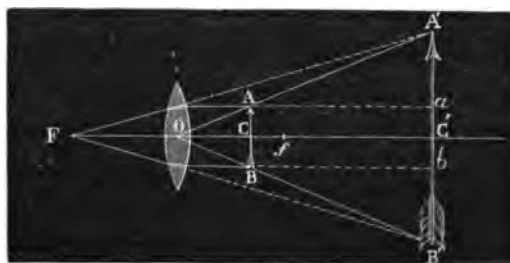


Fig. 161. — Marche des rayons lumineux dans la loupe.

entend par là la valeur des angles sous lesquels l'œil voit, soit l'un, soit l'autre de ces diamètres, supposés placés à la même distance de la vision distincte.

Dans le cas de la loupe, la distance de l'œil à la lentille pouvant être négligée, le grossissement est égal au rapport des angles A'OB' et *a*O*b*, ou sensiblement à celui des dimensions A'B', AB, lequel, enfin, est égal au rapport des distances OC' et OC.

La distance OC' étant celle de la vision distincte, le grossissement ne dépend plus, comme on voit, que de la distance OC de l'objet à la lentille, c'est-à-dire de la distance focale principale qui en diffère très-peu.

Ainsi, plus une loupe aura une courbure prononcée ou un court foyer, plus en outre la vision distincte de l'observateur sera longue, plus le grossissement sera considérable.

La loupe montée, comme le représente en coupe et en per-

spective la figure 162, 1, 2, est celle qu'emploient le plus souvent les horlogers et les graveurs. Elle se tient à la main ou même près de l'œil, où l'observateur la maintient par un effort des muscles des sourcils et de la joue : de la sorte les mains restent libres; mais il est préférable de l'adapter à un support ou *porte-loupe* (fig. 163 et 164).



FIG. 162. — Loupes de divers genres.

1, 2. Loupe des horlogers et des graveurs. — 3, 4, 5. Loupes achromatiques. — 6. Loupe de Stanhope. — 7. Loupe à surface cylindrique. — 8. Loupe rodée de Brewster, dite de Coddington. — 9. Loupe ou microscope à graines. — 13. Compte-fils. — 11, 12, 14 et 15. Loupes des naturalistes, biloupes et triloupes.

Le grossissement de ces loupes ne dépasse guère 5 fois; de plus, elles sont affectées d'un défaut assez grave : celui d'avoir une forte *aberration de sphéricité*. On nomme ainsi un phénomène dont la constatation est bien simple. Regardez un objet d'une certaine dimension avec une loupe semblable, vous verrez que l'image n'est très-nette que dans la partie centrale; sur les bords, elle est déformée et diffuse. De plus, elle est

irisée, ce qui tient à un autre défaut : celui du manque d'*achromatisme*. Mais elle a un avantage qui compense en partie ces inconvénients : celui d'avoir un champ étendu; sa grande distance focale permet aussi de mouvoir les mains et les objets au-dessous de la loupe, et de faire sans gêne le travail qu'on a en vue.

On diminue l'aberration de sphéricité en appliquant sur les bords de la lentille un diaphragme ou plaque annulaire opaque qui arrête les rayons de cette partie de la lentille; mais le champ se trouve ainsi diminué.

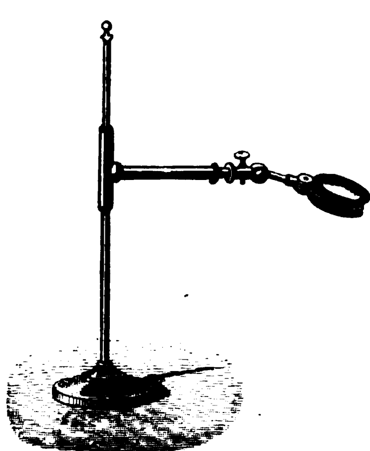


FIG. 163. — Porte-loupe.

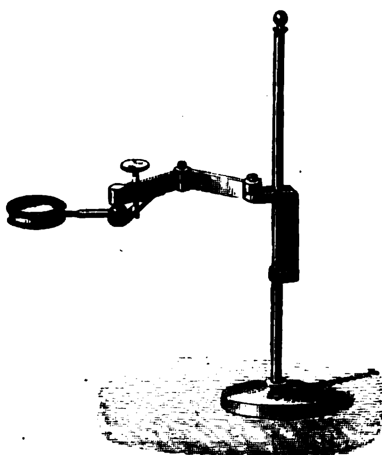


FIG. 164. — Porte-loupe, autre modèle.

Les loupes que représente la figure 162, 11, 12, 14 et 15, sont employées par les naturalistes. La même monture renferme deux ou trois grossissements différents : on nomme alors ces instruments *biloupes* et *triloupes*.

Pour détruire à la fois l'aberration de sphéricité et l'achromatisme, on compose la loupe, soit de deux lentilles plano-convexes dont les convexités se regardent, soit de deux lentilles toutes deux achromatiques, formées chacune, comme on le verra plus loin, de deux verres convenablement choisis. Les courbures peuvent être calculées de manière à détruire l'aberration de sphéricité.

La loupe *périscopique* de Wollaston et la loupe de *Brewster* ou de *Coddington* ont cela de commun, que le diaphragme est placé à l'intérieur, dans la masse du verre; mais la dernière est un secteur cylindrique découpé dans une sphère : le milieu du cylindre est taillé en gorge de manière à former diaphragme. On peut avec cette loupe obtenir des grossissements de 30 fois.

La loupe *Stanhope* est aussi formée d'un cylindre de verre, mais la courbure des deux surfaces n'est pas la même. En appliquant sur la surface la plus plate les petits objets transparents qu'on veut étudier, les grains de pollen, les écailles des ailes de papillon, etc., et en regardant par l'autre face du côté du jour, on obtient l'image éclairée et amplifiée de l'objet avec un grossissement qui peut atteindre 40 fois.

§ II — Le Microscope simple — Doublet de Wollaston

Le *microscope simple* (inventé par Cuff, et qu'on nomme aussi *microscope de Raspail*) est une loupe montée sur un support de cuivre, qui soutient lui-même une plaque, ou *porte-objet*, sur laquelle se pose l'objet qu'on veut étudier, et, plus bas, un miroir plan ou concave, destiné à projeter la lumière du jour sur le même objet. Par le jeu d'un bouton et d'une crémaillère, on peut élever ou abaisser soit la loupe, soit le porte-objet, pour *mettre au point*, c'est-à-dire pour les placer l'un et l'autre dans la position la plus favorable à la production d'une image nette, position qui varie selon les individus ou selon les grossissements employés. La plaque est percée d'une ouverture qui laisse passer la lumière envoyée par le miroir, et l'objet se pose sur une lame de verre au-dessus de l'ouverture.

La figure 165 représente un microscope simple plus compliqué. Il y a deux loupes qui peuvent prendre des directions plus ou moins inclinées, de façon à rendre possible l'examen de l'objet sur toutes ses faces.

Au lieu d'une loupe simple, on adapte souvent au microscope une loupe formée de deux verres séparés par un diaphragme dans le but de détruire l'aberration de sphéricité et d'avoir une

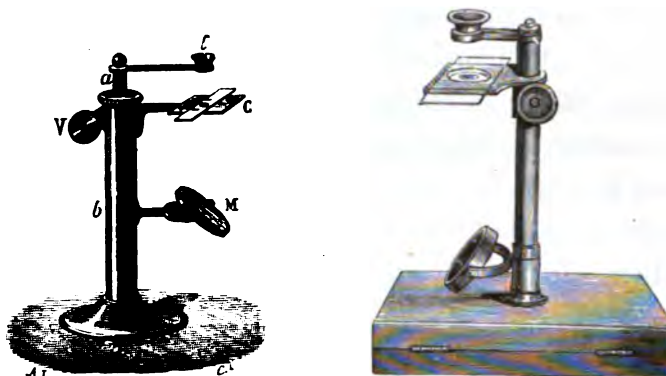


FIG. 165. — Microscopes simples.

loupe achromatique : c'est le *doublet*, inventé par Wollaston. La figure 166 donne la coupe d'un doublet perfectionné par Ch. Chevalier.



FIG. 166. — Microscope simple à doublets. — Doublet de Wollaston, modifié par Ch. Chevalier.

La loupe *composée* (fig. 167) remplit le même objet : ce sont des loupes à lentilles convexes, de grossissements et de champs différents, qu'on peut superposer à volonté.

La loupe et le microscope simple ont rendu aux sciences de

grands services. Ce dernier est employé surtout pour la préparation et la dissection des objets, notamment pour l'anatomie végétale, car les histologistes lui préfèrent, pour la dissection des tissus animaux, le microscope composé. Dans ce cas, on dépasse rarement les grossissements de 60 fois, parce que, avec des amplifications plus fortes, le foyer de la lentille est si court, que la place manque au-dessous pour la manipulation. Pour les simples observations, on peut employer des doublets qui grossissent jusqu'à 500 fois ; mais, en ce cas, le foyer de la loupe n'est que de $0^{mm},45$, pas la moitié d'un millimètre.



Fig. 167. — Loupe composée.

§ III — Le Microscope composé

Dans le *microscope composé*, il y a deux systèmes de lentilles : l'un qu'on nomme l'*oculaire*, parce que c'est celui qu'on place près de l'œil ; l'autre, l'*objectif*, ainsi nommé parce qu'il est tourné vers l'objet dont il s'agit d'obtenir une image amplifiée.

L'objectif est une lentille *biconvexe* qui fournit une image réelle, déjà grossie, mais renversée de l'objet. C'est cette image qu'on examine à l'aide de l'oculaire, lequel joue ainsi le rôle d'une loupe ; seulement, cette loupe sert à voir et à amplifier, non plus l'objet, mais son image.

La figure 168 montre quelle est, dans le microscope composé, la marche des rayons lumineux. O' est l'oculaire, et O l'objectif, au devant duquel on voit le petit objet *ba*. L'objectif produit en a_1b_1, qui est le foyer de la loupe oculaire, une image agrandie qui sert à son tour d'objet : cette image est renversée, et comme l'oculaire ne fait que l'amplifier sans la redresser, l'œil voit

l'objet lui-même renversé, comme s'il était en AB, c'est-à-dire à la limite inférieure de la vision distincte.

Tel est l'appareil optique du microscope composé réduit à son expression la plus simple. Mais il y a lieu, comme pour la loupe, de corriger les défauts, soit de l'objectif, soit de l'oculaire, au point de vue de l'aberration de sphéricité et de l'aberration de réfrangibilité.

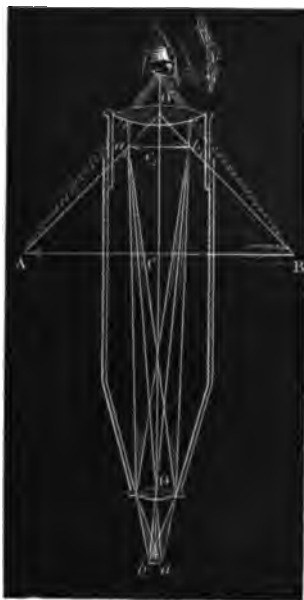


FIG. 168. — Marche des rayons lumineux dans le microscope composé.

On corrige le premier défaut en limitant l'étendue de l'image réelle au moyen d'un diaphragme placé au foyer de l'oculaire, c'est-à-dire en a_1b_1. Mais, comme ainsi on limite aussi le champ du microscope, on emploie un oculaire d'un grand diamètre, ayant par conséquent un champ plus étendu. Dans le même but, on se sert encore pour oculaire d'un système de deux lentilles plano-convexes dont la convexité est opposée à l'œil. C'est l'oculaire de Campani, qui a en même temps la propriété de détruire l'irisation des images ou de rendre l'objectif achromatique.



FIG. 169. — Oculaire achromatique de Campani.

SI est un pinceau lumineux parti des bords de l'objet; en se réfractant, il se divise en rayons colorés, les rouges suivant la direction IR, les violets la direction IV, de sorte que l'œil ver-

rait le bord de l'objet irisé, si le second oculaire L′ ne rendait les rayons colorés parallèles, en B′ où ils forment de la lumière blanche. C'est là que l'œil se place pour observer.

L'achromatisme s'obtient aussi en composant l'objectif de deux lentilles, l'une de flint-glass, l'autre de crown-glass, celle-ci biconvexe et celle-là divergente (fig. 170).

Le grossissement que donne le microscope composé est une combinaison du grossissement de l'objectif multiplié par celui de l'oculaire. Supposons l'image réelle fournie par le premier système amplifiée 20 fois; si l'oculaire la grossit encore 5 fois, il est clair que le grossissement total sera de 100 fois.

Dans tout cela, il n'est question, bien entendu, que du grossissement linéaire ou en *diamètre*. Le grossissement en surface est évidemment égal au carré du nombre qui mesure le premier. Ainsi, pour une amplification en diamètre de 50, de 100, de 500, la surface de l'objet se trouve amplifiée 2500, 10 000, 250 000 fois. D'après M. Arthur Chevallier, on construit aujourd'hui des microscopes composés dont les systèmes optiques sont divisés en neuf séries selon le grossissement, depuis le n° 1, qui donne un pouvoir de 25 à 50 diamètres, jusqu'au n° 9, qui grossit de 600 à 1300 fois. Avec cette dernière amplification, les surfaces sont multipliées par le nombre énorme 1 690 000. Il est donc possible d'apercevoir des parties de la matière qui ont des millièmes de millimètre d'étendue. Mais il ne faut pas oublier que l'art d'observer au microscope ne s'acquiert que par une longue habitude : l'œil a besoin de faire son éducation pour utiliser les grossissements les plus forts, et les étudiants qui veulent arriver à l'habileté des maîtres feront bien de commencer leurs observations par l'emploi gradué des faibles amplifications. Faisons aussi observer que plus le grossissement est considérable, plus la lumière qui est répandue sur l'objet et qui le rend visible se divise et se diffuse, plus il est donc nécessaire d'employer une lumière vive pour éclairer l'objet.



FIG. 170.

Passons maintenant en revue quelques-unes des dispositions

adoptées par les constructeurs pour les microscopes composés.

Comme dans le microscope simple, on distingue trois parties principales : l'appareil *optique*, qui contient l'oculaire et l'objectif, renfermés dans un même tube ; le *porte-objet*, qui prend des formes variées, mais qui est le plus souvent formé par une platine percée d'une ou plusieurs ouvertures circulaires sur lesquelles on pose le verre qui porte l'objet ; enfin le *miroir*, qui réfléchit la lumière sur le verre et l'objet lui-même. Si l'objet n'est pas transparent, on l'éclaire par-dessus au moyen d'une lentille disposée latéralement et pouvant se mouvoir en divers sens.

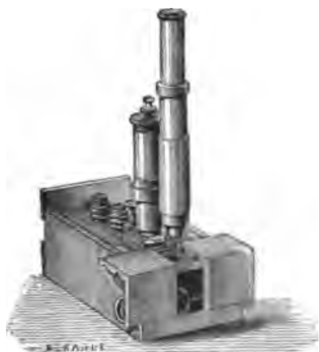


FIG. 171. — Microscope composé, monté sur sa boîte.



FIG. 172.—Microscope inclinant de Nachet.



FIG. 173. — Microscope horizontal d'Amici.

Tantôt le tube optique est vertical (fig. 171 et 174) ; tantôt il est susceptible de s'incliner obliquement (fig. 172) ; tantôt enfin,

comme dans le microscope d'Amici (fig. 173), il est coudé à angle droit : la partie horizontale renferme l'oculaire, la partie verticale l'objectif; à leur rencontre, un miroir incliné à 45°, ou un prisme, réfléchit les rayons lumineux sortis de l'objectif et les renvoie horizontalement dans l'oculaire.



FIG. 174. — Observation au microscope composé.

Pour obtenir des images qui donnent la sensation du relief, laquelle n'existe pas quand on observe avec un œil seul, M. Nachet a construit des microscopes où l'appareil optique est double : c'est ce qu'on nomme le *microscope binoculaire* (fig. 176). On comprendra la nécessité de cette disposition, quand nous étudierons la vision stéréoscopique.

Le même constructeur fait des microscopes à trois corps, qui permettent l'observation simultanée par trois personnes diffé-

rentes. Ces instruments sont précieux dans l'enseignement de la micrographie.

Enfin, on fait aussi des microscopes spéciaux pour les chimistes (fig. 177). Le porte-oculaire est incliné et va aboutir au-dessous de l'objectif placé lui-même au-dessous du porte-

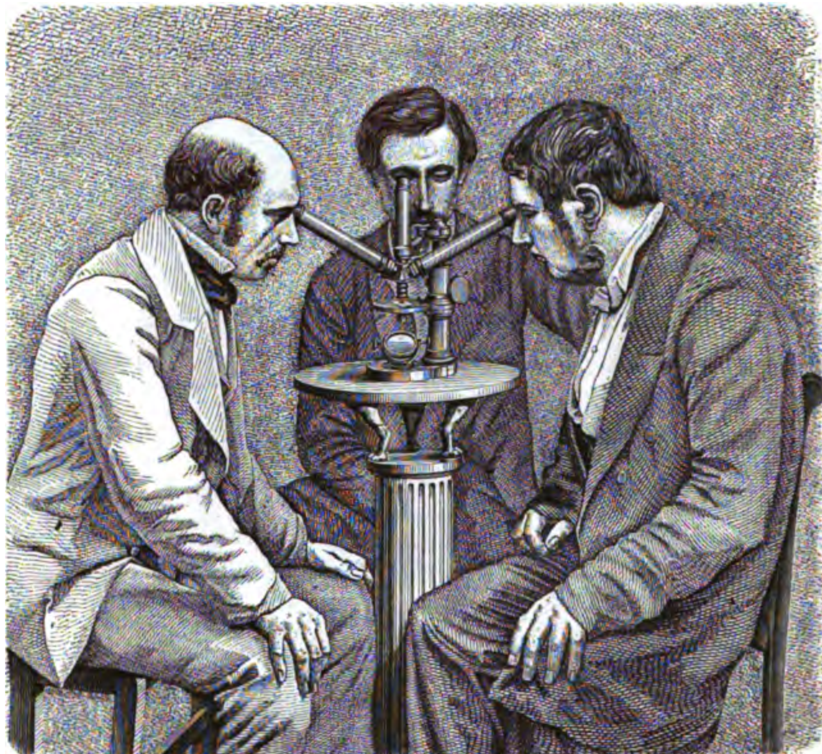


FIG. 175. — Microscope à trois corps pour les observations simultanées.

objet. Un prisme renvoie, par le phénomène de réflexion totale, les rayons lumineux dans la direction de l'œil.

Nous terminerons cette description du microscope, en rappelant celle d'un appareil qui a pour objet de projeter à distance sur un écran, les images agrandies, de manière à les rendre visibles à la fois pour un grand nombre de spectateurs. C'est le *microscope solaire*, décrit dans les *Phénomènes de la physique*, et qui est ainsi nommé parce que la lumière avec laquelle on éclaire l'objet est la lumière directe des rayons du soleil.

Quand le soleil ne brille point, on serait obligé de se passer de ce moyen puissant de démonstration dans les cours, si l'on n'avait à sa disposition une source presque aussi vive de lumière que le soleil : nous voulons parler de la lumière électrique. De là le microscope photo-électrique que représente la figure 178.

Enfin, il est une application importante de la microscopie que nous ne pouvons passer sous silence, c'est celle qui permet de



Fig. 176. — Microscope binoculaire.



Fig. 177. — Microscope à l'usage des chimistes.

photographier, dans tous leurs détails si précis et si curieux, les images des objets observés par les micrographes, et de rendre ainsi durables des observations souvent fugitives.

Pour donner une idée des immenses services que le microscope a rendus à la science, pour initier le lecteur qui n'a pas cet instrument précieux à sa disposition, aux merveilles du monde de l'infiniment petit, nous reproduisons, dans les trois planches IX, X et XI, quelques échantillons d'objets vus au microscope et pris dans les trois grandes branches des corps naturels, les animaux, les végétaux et les minéraux. C'est à l'obligeance de notre ami Georges Pouchet, sous-directeur du cabinet

et du laboratoire d'histologie que dirige M. Robin, et au talent d'un habile dessinateur, M. Deyrolle, que nous devons ces belles planches : les notes suivantes que M. Pouchet a bien voulu rédiger pour servir de texte explicatif aux dessins en rendront

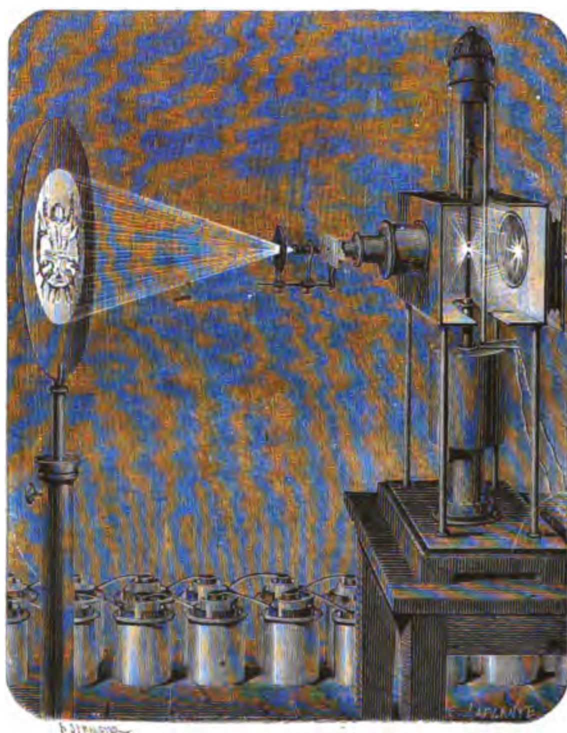


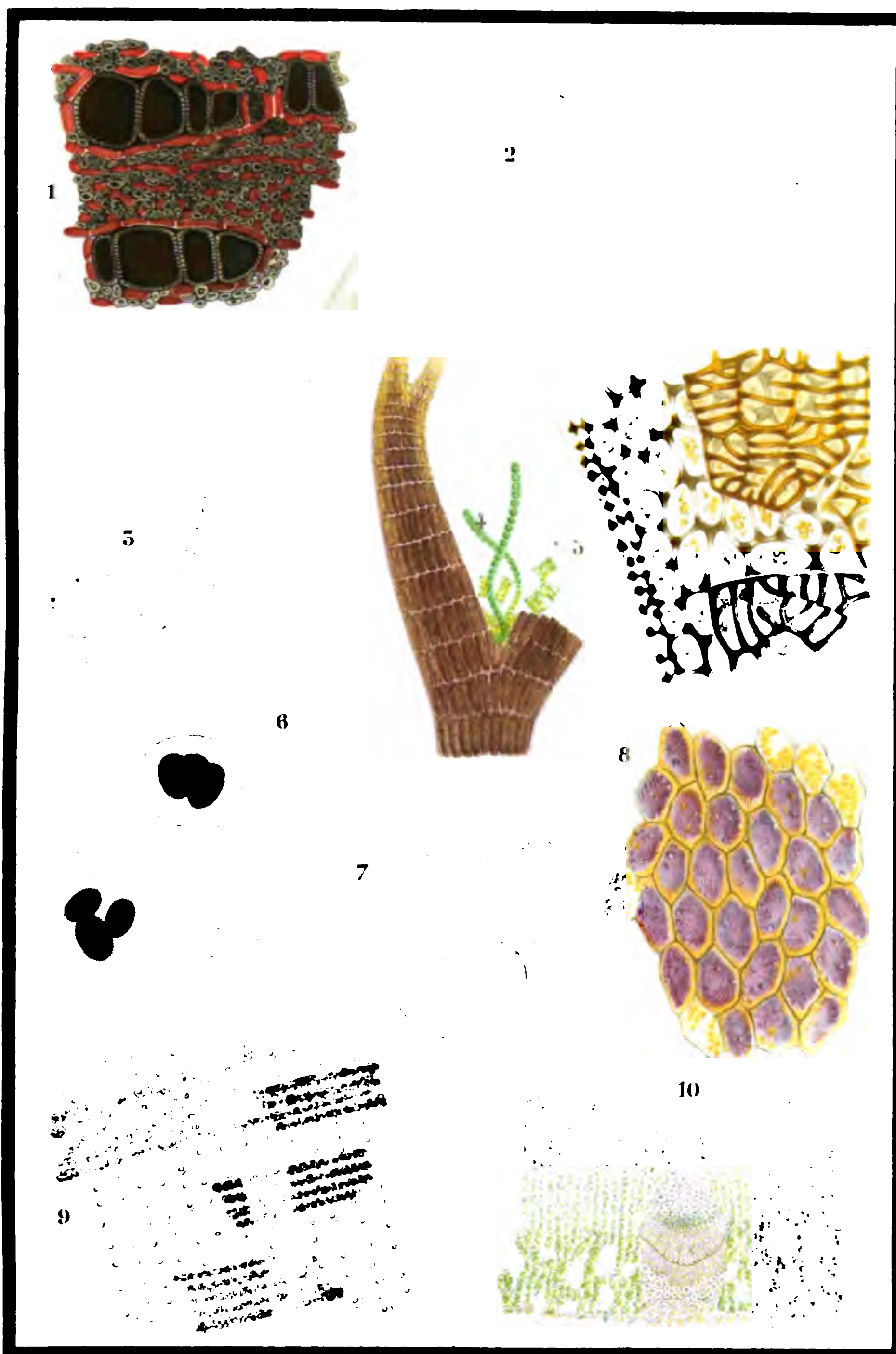
FIG. 178. — Microscope photo-électrique.

l'intelligence facile. Puissent ces spécimens d'une des plus belles applications de la physique à la science engager quelques-uns de nos lecteurs à se livrer aux études si attrayantes de la micrographie !

PLANCHE IX

1. *Cristaux de sang*, vus à un grossissement de 600 à 700 diamètres. — On appelle ainsi des cristaux colorés qui peuvent se former spontanément dans le sang de l'homme ou des animaux, soit après la mort, soit dans le cours de certaines maladies. En général, pour les obtenir, on lave du sang frais avec de l'éther, et on laisse reposer ; au bout de quelques jours, on trouve parfois un abondant dépôt de ces cristaux.





LE MICROSCOPE

APPLIQUÉ À L'ÉTUDE DES VÉGÉTAUX.

1. Coupe mince de bois d'ébène, grossissement 350 d. _ 2. Trachées des végétaux, 350 d. _ 3. Poil d'ortie, 150 d. _ 4. Fragment d'une petite algue rouge de nos côtes, 60 d. _ 5. Fragment d'hépatique, 250 d. _ 6. Fragment de truffe, 350 d. _ 7. Grains de pollen. _ 8. Fragment d'une fleur de giroflée, 350 d. _ 9. Fragment de bois de cèdre, 350 d. _ 10. Coupe transversale du milieu d'une feuille de buis.

2. *Cristal* obtenu en traitant par un mélange bouillant d'alcool et d'éther des *œufs de homard* écrasés. — Ceux-ci, quand on les prend sous le ventre de l'animal vivant et qu'on les écrase, forment une bouillie verte. Dès qu'on ajoute le réactif, elle devient rouge et se solidifie. Si on la jette alors sur un filtre, le mélange d'éther et d'alcool passe avec une belle couleur pourpre, et laisse déposer en se refroidissant des cristaux qui offrent par transparence l'aspect représenté et qui, à la lumière réfléchie, ont un beau reflet métallique bleu. — Grossissement de 100 diamètres environ.

3. *Cristaux de santonine* vus à la lumière polarisée à travers une lame de mica ou de sélénite. — Ces cristaux sont par eux-mêmes très-légèrement jaunâtres; ils doivent leurs couleurs variées à la polarisation. — Grossissement de 50 diamètres environ. — Ces cristaux sont extraits de la drogue connue en pharmacie sous le nom de *semen-contra* et qu'on emploie contre les vers. Elle jouit de la propriété, quand on en a pris à dose élevée, de faire voir tout en jaune, mais c'est une expérience dangereuse et dont la vue peut souffrir.

4. *Or mosaïque*, minerai d'or attaché à une pierre vitreuse (grossissement de 60 diamètres environ). — L'or, disposé en grains irréguliers, offre diverses couleurs dépendant de l'état de pureté plus ou moins grand où il se trouve.

5. *Cristaux de chlorhydrate d'ammoniaque* (grossissement de 100 diamètres environ). — Il suffit, pour les obtenir, de mouiller une lame de verre avec de l'acide chlorhydrique et de l'exposer ensuite aux vapeurs d'ammoniaque. Il se forme aussitôt des cristaux extrêmement variés de forme et de figure qui finissent par occuper toute la lame.

6. *Cristaux de sel marin* (grossissement de 100 diamètres). — Pour les obtenir, il suffit de déposer une goutte d'eau où l'on a mis un grain de sel sur une lame de verre. A mesure que l'eau s'évapore, il se forme une infinité de cristaux. Ceux-ci appartiennent au système cubique, mais ils sont souvent aussi excavés sur leurs faces, dans lesquelles sont creusées des cavités en escalier; d'où ces cristaux ont été dits *en trémies*.

7. *Titane cristallisé*, en cubes également, sur les scories d'un haut fourneau. — Grossissement de 60 diamètres.

8. *Cristaux de bichromate de potasse* (grossissement de 100 diamètres). — Pour les obtenir, il suffit de laisser pendant quelque temps sur une lame de verre une goutte d'une solution de bichromate de potasse. On voit bientôt les cristaux se former et grandir dans le champ du microscope.

9. *Cuivre natif* (grossissement de 60 diamètres). — Certains minerais de cuivre, particulièrement dans le pays de Galles, présentent des échantillons de ce cuivre fibreux.

PLANCHE X

FIG. 1. *Coupe mince de bois d'ébène.* — Il contient dans ses cellules deux sortes de matières colorantes, l'une rouge, l'autre noire, renfermée dans des cellules beaucoup plus grandes. Les fibres de bois que l'on voit également coupées en travers sont brunes. — Grossissement de 350 diamètres.

FIG. 2. *Trachées des végétaux.* — Celles-ci sont formées d'un vaisseau contre la paroi interne duquel est enroulé un filament en spirale. D'autres fois ce filament est remplacé par une série d'anneaux plus ou moins réguliers. On distingue dans le

voisinage un certain nombre de cellules à mince paroi en partie remplies de matière verte. — Grossissement de 350 diamètres.

Fig. 3. *Poil d'ortie.* — La base renflée est remplie de cellules avec de la matière verte. Le reste du poil est formé par une seule cellule à parois dures et cassantes, ayant la forme d'une pointe. Cette cellule est remplie d'un liquide âcre. Quand l'extrémité du poil d'ortie pénètre dans les chairs, elle se brise ordinairement, et le liquide qu'elle contient est versé dans la plaie, de là l'inflammation et les douleurs qui en sont la conséquence. — Grossissement de 150 diamètres.

Fig. 4. *Fragment d'une petite algue rouge de nos côtes.* — Dans l'aisselle d'une division de cette algue, on distingue de petites algues vertes et des diatomées, sortes d'êtres microscopiques dont la nature est mal déterminée et qui forment des figures rectangulaires réunies par un de leurs angles. — Grossissement de 60 diamètres.

Fig. 5. *Fragment d'hépatique*, sorte de mousse dont la feuille est formée de deux couches superposées. — L'une de ces couches est composée de cellules à parois épaissès et contenant quelques grains de couleur jaune brunâtre. Au-dessus de cette couche on en voit une autre qui semble formée par des portions de grillage rapprochées les unes des autres. — Grossissement de 250 diamètres.

Fig. 6. *Fragment de truffe* montrant deux capsules avec des *spores*, ou corps reproducteurs, vues au grossissement de 350 diamètres. — Le tissu de la truffe est formé de cellules pâles, enchevêtrées, au milieu desquelles, de place en place, se trouvent des *spores* contenues au nombre de deux ou trois dans des cellules plus grandes. Ces spores, hérissées de pointes, sont évidemment destinées à la reproduction de la truffe ; cependant on ne les a jamais vues germer, et l'on ignore quelles sont les conditions nécessaires pour qu'elles se développent en une truffe nouvelle.

Fig. 7. *Grains de pollen.*

Fig. 8. *Fragment d'une fleur de giroflée* montrant les cellules remplies par deux matières colorantes dont les effets se combinent : l'une est jaune et formée de granules ; l'autre est violette, liquide. — Grossissement de 350 diamètres.

Fig. 9. *Fragment de bois de cèdre* avec lequel sont faits ordinairement les crayons. — Grossissement de 350 diamètres.

Fig. 10. *Coupe transversale du milieu d'une feuille de buis.* — Le centre est formé de fibres ligneuses coupées ici en travers ; sur les côtés, les cellules pleines de matière verte offrent une disposition différente vers le dessus et vers le dessous de la feuille. Dans cette dernière région, les cellules laissent entre elles des vides remplis d'air. On peut distinguer de chaque côté une mince pellicule transparente qui recouvre de chaque côté le tissu de la feuille.

Planche XI

Fig. 1. *Globules rouges de sang* avec trois globules blancs, grossis 900 fois. — C'est à la présence de ces corps, appelés hématies par les anatomistes, que le sang doit sa belle couleur rouge. Le liquide où ils sont en suspension est jaune-citron. Eux-mêmes, quand on les examine dans le champ du microscope à la lumière transmise, paraissent jaunes. Ils ont la forme de disques excavés sur leurs deux

[illegible] les [illegible] en parties [illegible] [illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

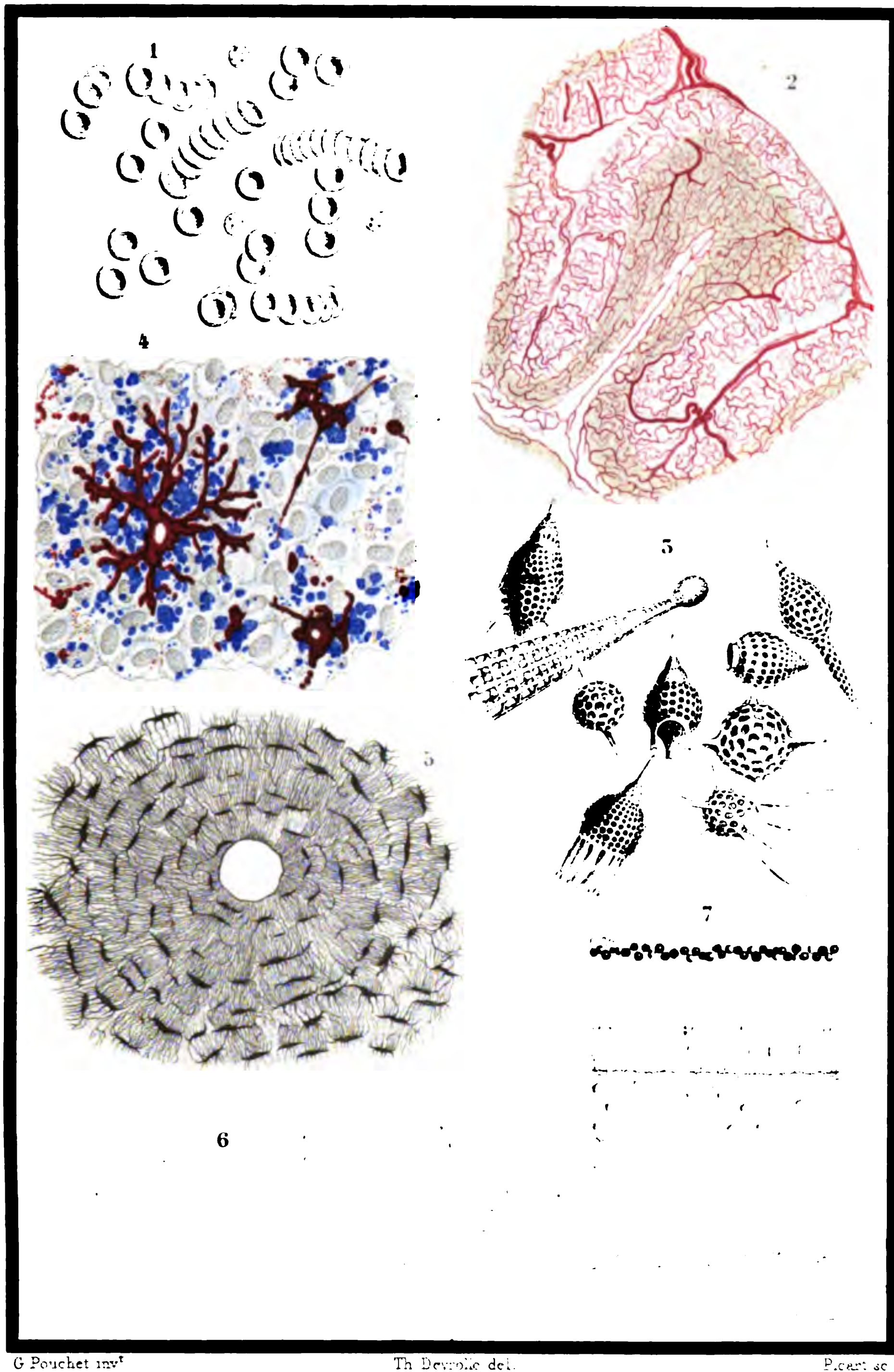
[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]



G. Pouchet inv[t] Th. Deyrolle del. Picart sc.

LE MICROSCOPE

APPLIQUÉ À L'ÉTUDE DES ANIMAUX.

1. Globules de sang ou hématies, grossissement, 900 d. — 2. Distribution du sang dans la substance cérébrale, 60 d. — 3. Polycystines fossiles des Barbades, 60 d. — 4. Tissu sous-jacent d'une carapace d'écrevisse, 250 d. — 5. Fragment de tissu osseux, 250 d. — 6. Infusoires du genre Kolpode, 900 d. — 7. Fragment de la rétine d'un oiseau, 500 d.

faces, et dès qu'ils sont sortis de la veine, on les voit se disposer en piles comme des pièces de monnaie. Le diamètre exact des hématies chez l'homme est de 7 millièmes de millimètre. Près d'elles, sont représentés trois globules blancs sphériques et d'une tout autre nature, mais qu'on trouve toujours mêlés aux éléments du sang.

Fig. 2. *Distribution du sang dans la substance cérébrale*, vue à un grossissement de 60 diamètres environ. — Les dernières divisions des veines et des artères réduites à l'état de vaisseaux, appelés capillaires, quoiqu'ils soient beaucoup plus petits que le diamètre d'un cheveu, dessinent des mailles qui forment sous l'œil une élégante arabesque. Les plus fins de ces vaisseaux ont juste le diamètre nécessaire pour laisser passer une hématie.

Fig. 3. *Polycystines fossiles* des Barbades, à un grossissement de 60 diamètres environ. — On trouve dans ces îles des couches entières de terrain qui sont formées par ces débris élégants d'animaux microscopiques. Ce qui est curieux, c'est que ces coques, si artistement dessinées, et qui constituent toute la partie solide de l'animal, se forment au milieu d'un tissu mou, n'ayant pas même de figure déterminée et qui enveloppe ces parties calcaires ou siliceuses si artistement découpées.

Fig. 4. *Fragment du tissu sous-jacent à la carapace*, chez une petite *écrevisse* longue de 2 centimètres environ et montrant deux sortes de pigments. — L'un, d'un beau rouge, est contenu dans des cellules plus ou moins irrégulières et de forme rameuse. Ces cellules contiennent en leur milieu un ou deux noyaux qui se distinguent parce qu'ils sont incolores. Le pigment bleu est formé par des grains. Ces derniers sont toujours placés dans le voisinage immédiat de cellules rouges, et il en résulte un contraste de couleur extrêmement remarquable dans le champ du microscope. Le grossissement est ici de 250 diamètres environ. Il résulte de là que quand on n'emploie pas l'instrument grossissant, l'œil ne peut plus distinguer la cellule rouge des granules bleus qui l'entourent; il ne voit plus que l'ensemble, sous forme d'une petite tache grosse comme la pointe d'une aiguille et qui paraît brune par le mélange des deux couleurs.

Fig. 5. *Fragment du tissu qui constitue les os*, vu au grossissement de 250 diamètres environ. — L'espace vide qui est au milieu est destiné à livrer passage aux vaisseaux capillaires qui parcourent la substance osseuse. Autour de ces vaisseaux sont disposés d'autres espaces et d'autres conduits extrêmement fins (canalicules osseux), qui sont remplis pendant la vie, mais qui deviennent vides quand l'os se dessèche. Ils apparaissent alors comme on les voit représentés ici. Ces canalicules, extrêmement fins et communiquant les uns avec les autres, mesurent en général moins d'un demi-millième de millimètre de diamètre.

Fig. 6. *Animaux infusoires* appartenant au genre *kolpode*, grossis environ 900 fois. — On distingue latéralement en avant l'orifice buccal, et en arrière une vésicule jaune contractile qui présente des pulsations comme le cœur. Les corps bleuâtres qui avoisinent le cœur sont des *bouchées* d'aliments que l'animal a avalées et qui tombent dans l'intérieur de ses tissus, où elles sont digérées peu à peu, sans être reçues, comme chez les autres animaux, dans une cavité intestinale.

Fig. 7. *Coupe d'un fragment de la rétine d'un oiseau*, grossi 500 fois environ. — La rétine est la membrane nerveuse extrêmement mince et délicate qui tapisse le fond de l'œil et qui est impressionnée par les rayons lumineux. Malgré son peu d'épaisseur, cette membrane présente, comme on peut le voir, une structure

extrêmement complexe, et l'on n'y compte pas moins de sept ou huit couches distinctes.

Chez les oiseaux et les reptiles, la rétine présente une série de gouttes colorées qui apparaissent à peu près vers le même rang comme autant de perles. La région où se trouvent celles-ci est la partie de la rétine sensible par excellence, et cette partie est en même temps celle qui est immédiatement appliquée contre le fond de l'œil, en sorte que les rayons lumineux venant du dehors doivent traverser, pour l'impressionner, toute l'épaisseur de la rétine.

CHAPITRE IV

LE TÉLESCOPE

Le microscope nous permet de pénétrer dans les mystères de l'infiniment petit; il met à la portée de la vue humaine les objets les plus infimes, et fait voir d'une manière distincte les mille détails qui envoient à l'œil nu une lumière trop faible pour impressionner la rétine.

Ce que le microscope fait pour les objets à notre portée, mais trop petits, le télescope le réalise avec une pareille puissance pour les objets que leur éloignement rend invisibles, quelles que soient leurs réelles dimensions. Il sonde les profondeurs de l'espace et rend accessibles à la vue des astres dont l'homme, sans son secours, n'eût pas même soupçonné l'existence. Il rapproche ceux qu'on peut observer à la vue simple, et alors ce sont les détails de leur structure qu'il révèle à la science, multipliant ainsi pour notre curiosité les objets que la nature offre à l'observation, et à l'aide desquels l'intelligence humaine parvient à découvrir ses lois.

Le nom de *télescope* est tiré du grec comme celui de *microscope;* l'un et l'autre ont pour racine commune le mot σκοπέω (*scopeó*), je regarde; μικρὸς (*micros*) signifie *petit*, et τῆλε (*téle*), *au loin*. L'étymologie permet donc d'appliquer le nom

de *télescope* à tous les instruments qui ont pour effet de rapprocher les objets éloignés en amplifiant leur image. Mais en France on a coutume de réserver le nom de *lunettes* aux télescopes exclusivement réfracteurs, c'est-à-dire formés uniquement de certaines combinaisons de verres ou de lentilles; tandis que le nom de *télescope* s'applique plus spécialement aux instruments dans lesquels entre un miroir ou réflecteur; on dit quelquefois alors de ces derniers que ce sont des télescopes *catadioptriques*. Nous nous conformerons ici à l'usage, qui cependant n'est guère justifié, et nous décrirons successivement les *lunettes* et les *télescopes*.

§ I — Les Lunettes

A quelle date remonte l'invention des *lunettes*? L'inventeur de ce merveilleux instrument d'investigation terrestre et céleste est-il parfaitement connu?

A ces questions, les érudits ne font que des réponses douteuses comme pour mainte autre découverte scientifique. Seulement, ici, on peut être assuré que la prétention de faire remonter la découverte des lunettes grossissantes à l'antiquité et même au moyen âge, n'est fondée sur rien de sérieux. C'est vers la fin du XVIe siècle qu'on trouve la première mention, faite par Porta, de la possibilité de combiner deux lentilles, l'une concave, l'autre convexe, « pour voir agrandis et distincts tant les objets voisins que les objets éloignés ». Mais c'est un opticien de Middelbourg, Jean Lippershey, qui réalisa le premier cette combinaison et construisit la première lunette télescopique (1606). Jacques-Adrien Metius (1608) et Galilée en 1609 paraissent avoir trouvé eux-mêmes la solution du problème d'optique indiqué par Porta; mais il faut dire que le grand physicien et astronome de Florence avait eu connaissance de la découverte de Lippershey, sans du reste avoir eu, paraît-il, aucun renseignement précis sur l'instrument lui-même.

Maintenant, comment l'opticien hollandais arriva-t-il au

but? Là, on ne sait rien de positif; ce qui le prouve, c'est qu'il y a deux versions, deux légendes différentes sur ce sujet. Rapportons-les toutes deux d'après Arago :

« Hieronymus Sirturus, dit-il, rapporte qu'un inconnu, *homme* ou *génie*, s'étant présenté chez Lippershey, lui commanda plusieurs lentilles convexes et concaves. Le jour convenu, il alla les chercher, en choisit deux, l'une concave, la seconde convexe, les mit devant son œil, les écarta peu à peu l'une de l'autre, sans dire si cette manœuvre avait pour objet l'examen du travail de l'artiste ou toute autre cause, paya et disparut. Lippershey se mit incontinent à imiter ce qu'il venait de voir faire, reconnut le grossissement engendré par la combinaison des deux lentilles, attacha les deux verres aux extrémités d'un tube, et se hâta d'offrir le nouvel instrument au prince Moritz de Nassau.

» Suivant une autre version, les enfants de Lippershey, en jouant dans la boutique de leur père, s'avisèrent de regarder au travers de deux lentilles, l'une convexe, l'autre concave; ces deux verres, s'étant trouvés à la distance convenable, montrèrent le coq du clocher de Middelbourg grossi ou notablement rapproché. La surprise des enfants ayant éveillé l'attention de Lippershey, celui-ci, pour rendre l'épreuve plus commode, établit d'abord les verres sur une planchette; ensuite il les fixa aux extrémités de deux tuyaux susceptibles de rentrer l'un dans l'autre. A partir de ce moment, *la lunette était trouvée.* » (*Astronomie populaire*, d'après un mémoire d'Olbers.)

Une lunette se compose, comme le microscope composé, de deux parties essentielles, de deux systèmes de lentilles. L'un, tourné vers l'objet, se nomme, pour cette raison, l'*objectif* : c'est ordinairement une lentille biconvexe, à long foyer, qui produit une image réelle et renversée de l'objet. A l'autre système de lentilles s'adapte l'œil; il se nomme l'*oculaire* : c'est, en somme, une loupe simple ou composée, à l'aide de laquelle on examine l'image, qui se trouve ainsi agrandie dans une certaine mesure.

L'oculaire des premières lunettes était, comme on l'a vu plus haut, une lentille biconcave; l'image renversée formée par l'objet se trouve redressée dans ce système, ainsi qu'on peut s'en rendre compte par la marche des rayons lumineux et la formation des images que représente la figure 179. L'objectif O fournit à son foyer, qui, pour les objets très-éloignés, est le foyer principal de la lentille, une image réelle *ba* de l'objet observé. Cette image est, nous l'avons dit, renversée, comme on pourrait s'en assurer en la recevant sur un écran. L'oculaire biconcave O′, placé entre l'image et l'objectif, fait diverger les faisceaux lumineux et empêche ainsi la formation de l'image

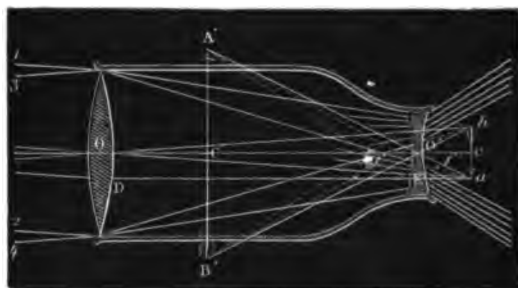


Fig. 179. — Marche des rayons lumineux dans la lunette de Galilée.

réelle. Pour l'œil, où pénètrent ces faisceaux après leur sortie de l'oculaire, ils semblent venir des points A′ et B′ situés sur leurs axes optiques à leurs points de convergence. De là une image virtuelle redressée, A′B′, qui paraît nette, si les lentilles sont disposées de façon que cette image se forme à la distance de la vision distincte.

Il y a une différence essentielle entre le grossissement des lunettes et le grossissement des microscopes. Dans ces derniers instruments, l'image agrandie est plus grande en réalité que l'objet lui-même, c'est-à-dire que l'angle sous-tendu par l'image est plus grand que l'angle sous-tendu par l'objet, l'image et l'objet étant supposés tous deux à la même distance de l'œil. Dans les lunettes, au contraire, et ceci s'applique à tous les genres de télescopes, l'image est toujours inférieure en

dimensions à l'objet lui-même; mais elle est plus grande que l'image fournie par la vue simple, et c'est dans cette amplification que consiste le grossissement des lunettes.

Ainsi, avec deux lentilles seulement, la lunette que nous venons de décrire, et qui a reçu le nom de *lunette de Galilée*, montre les objets *droits* en même temps qu'elle les rapproche ou les agrandit.

Les premières lunettes de Galilée ne donnaient qu'un grossissement assez faible, de 4 à 7 fois en diamètre; la plus puissante qu'ait construite et employée l'illustre astronome grossissait 32 fois. Cela lui suffit pour faire une multitude de découvertes qui passèrent alors, à juste titre, pour merveilleuses : les montagnes de la Lune, les taches et le mouvement de rotation du Soleil, les satellites de Jupiter et les phases de Vénus, la décomposition en étoiles de la grande nébuleuse qu'on nomme Voie lactée, etc. Son *Messager céleste* (*Nuntius sidereus*), qu'il publia pour faire connaître aux hommes de science les résultats de ses recherches, suffisait à peine à enregistrer ces découvertes, qui constituèrent bientôt une branche de l'astronomie inconnue des anciens : l'*astronomie physique*.

Aujourd'hui, la lunette de Galilée n'est plus guère usitée en astronomie, son grossissement étant trop faible; mais on l'utilise comme lunette terrestre, et surtout pour l'examen des objets peu éloignés : ce n'est autre chose que la *lorgnette de spectacle*, très-commode parce que, à grossissement égal, elle est d'une longueur beaucoup moindre que les lunettes à oculaire convergent. Du reste, cette longueur doit pouvoir varier selon les vues, c'est-à-dire selon la distance de la vision distincte pour chaque observateur. A cet effet, l'oculaire est adapté à un tube qui est mobile dans le tube qui renferme l'objectif; un bouton qui engrène avec une crémaillère permet de faire varier insensiblement la distance des verres et de les placer de façon à obtenir une parfaite netteté de l'image : c'est ce qu'on nomme *mettre au point*. Les myopes doivent raccourcir la lunette et les presbytes l'allonger, pour voir distinctement.

Le grossissement, dans les lunettes de Galilée, est égal au rapport de la distance focale principale de l'objectif à celle de l'oculaire.

Le champ est peu étendu, et, comme les rayons sortent de l'oculaire en divergeant, il faut placer l'œil très-près pour ne pas diminuer encore cette étendue.

C'est le moment de dire un mot du perfectionnement apporté dans la construction des instruments d'optique par un opticien

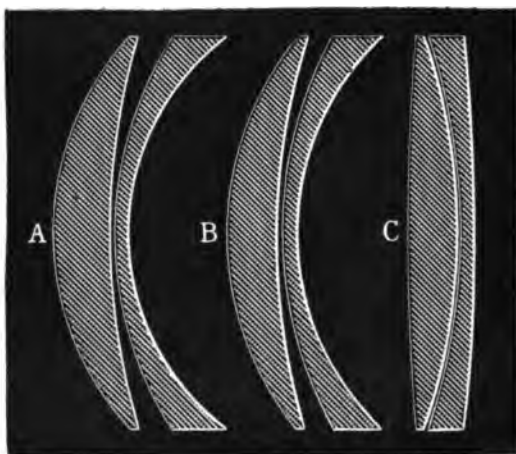


FIG. 180. — Lentilles achromatiques : A, objectif de Gauss; B,C, objectifs d'Herschel.

anglais, d'origine française [1], Dollond. Nous voulons parler de l'achromatisme des lentilles dont il a été question déjà quand nous avons décrit le microscope.

Quand un rayon de lumière blanche est réfracté par une lentille, les rayons colorés dont il se compose, n'ayant point le même indice de réfrangibilité, sont *dispersés;* d'où il résulte, pour les bords des images formées, une coloration ou irisation qui offre un grave défaut au point de vue de la netteté et de la vérité des images. Cette dispersion consiste en ce que chacun des rayons colorés a un foyer distinct situé à une distance diffé-

1. Dollond était issu d'une famille française protestante que la révocation de l'édit de Nantes força de se réfugier en Angleterre.

rente de la lentille. C'est ce défaut qu'on nomme *aberration de réfrangibilité*, et que Dollond a trouvé moyen de faire disparaître en composant les objectifs et les oculaires des instruments d'optique de deux ou plusieurs lentilles différentes, soit convergentes, soit divergentes, et en variant la nature du verre dont ces lentilles sont formées.



Fig. 181. — Lorgnette de spectacle avec objectif et oculaire achromatiques.

En formant la lentille convergente avec le verre ordinaire de nos glaces (crown-glass), et la lentille divergente, biconcave ou plano-concave, avec le cristal composé de verre où entre une certaine quantité de plomb (flint-glass); enfin, en donnant aux courbures de ces lentilles appliquées l'une sur l'autre des valeurs que fournit le calcul ou l'expérience, Dollond fabriqua des systèmes de lentilles *achromatiques*, c'est-à-dire telles que les rayons de lumière blanche, tout en se réfractant dans le sens voulu, conservaient leur parallélisme au sortir de la lentille, en un mot, n'étaient point dispersés. Depuis, on a varié



Fig. 182. — Lorgnette jumelle ou binoculaire.

de bien des manières les combinaisons propres à donner des systèmes achromatiques. Dans tout instrument soigneusement construit, on arrive ainsi à supprimer, ou à atténuer au moins considérablement, le défaut de l'aberration de réfrangibilité.

Dans la lunette de Galilée, l'achromatisme résulte déjà, en

partie, de cette circonstance que l'oculaire est divergent, tandis que l'objectif est une lentille convergente. En ayant soin de faire l'oculaire de flint-glass et l'objectif de crown-glass, on aurait l'achromatisme pour le système; mais alors les courbures des lentilles ne permettraient qu'un grossissement très-restreint, en général insuffisant. On préfère donc employer des lentilles où l'achromatisme est obtenu séparément.

La figure 181, représente une lorgnette de spectacle; on voit quelle est la combinaison adoptée pour l'oculaire et pour l'objectif. Ce dernier est formé d'une lentille biconcave de flint renfermée entre deux lentilles convexes de crown, tandis que l'oculaire est une lentille convexe de flint interposée entre deux lentilles concaves de crown. D'autres fois on achromatise l'objectif seul, et la courbure de l'oculaire est calculée de façon à accroître le grossissement.

§ II — Lunette astronomique

Arrivons maintenant à la *lunette astronomique*. On réserve ce nom au télescope réfracteur généralement employé aujourd'hui dans les observations astronomiques. La lunette astronomique consiste essentiellement en un système de deux lentilles convergentes : l'une, l'objectif, donnant l'image réelle et renversée de l'objet; l'autre, l'oculaire, amplifiant la première, mais lui conservant sa position renversée. Il va sans dire que les deux lentilles sont elles-mêmes composées de façon à produire l'achromatisme des images. Suivons, à l'aide de la figure 183, la marche des rayons lumineux dans la lunette astronomique, et nous verrons aisément en quoi elle diffère de la lunette de Galilée.

Les rayons partis de l'extrémité supérieure de l'objet, qu'on suppose situé à une distance infinie, forment un faisceau parallèle 1, 2, en arrivant à l'objectif O. En sortant de ce dernier, où ils se réfractent, ils vont former, par leur convergence en *a*,

une image de cette extrémité. De même le faisceau 3, 4, émané de la partie inférieure, donne lieu à une image réelle *b*. Il se forme en définitive une image renversée et réelle de l'objet à la distance focale principale de l'objectif, en *ab*. C'est cette image que la loupe, ou oculaire O′, permet de voir agrandie, mais toujours renversée, en A′B′, c'est-à-dire à une distance de l'œil égale à la distance de la vision distincte.

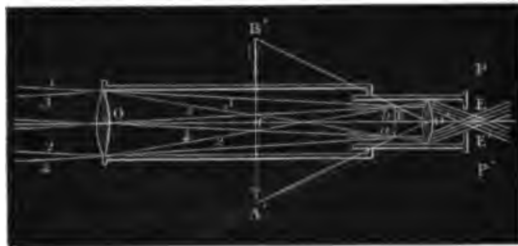


FIG. 183. — Marche des rayons lumineux dans la lunette astronomique.

Comme dans la lunette de Galilée, le grossissement est égal au rapport qui existe entre les distances focales principales de l'objectif et de l'oculaire. Ainsi, plus l'objectif est une lunette à long foyer, plus le foyer de l'oculaire est court, plus le grossissement linéaire de l'oculaire est considérable. Il ne s'agit ici que des lunettes où l'oculaire est formé d'une seule lentille achromatique ou non. La valeur du grossissement s'exprime par une autre formule quand l'oculaire est composé d'un système de lentilles.

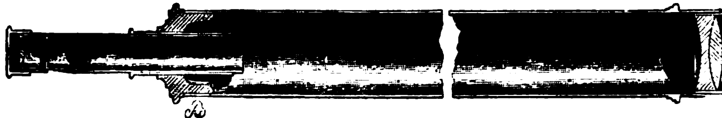


FIG. 184. — Lunette astronomique : coupe ou vue intérieure.

Les figures 184 et 185 montrent quelle est la disposition intérieure de la lunette astronomique, et comment on la monte sur un pied pour rendre l'usage et l'observation commodes.

L'oculaire est formé de deux lentilles plano-convexes sépa-

rées par un diaphragme et adaptées à un tuyau mobile dans le grand tuyau qui porte l'objectif.

A l'aide d'un bouton extérieur V, on enfonce plus ou moins le tube de l'oculaire, de façon à le *mettre au point*, c'est-à-dire dans la position où l'image se forme parfaitement distincte, ce qui dépend à la fois et du grossissement employé et de la vue de l'observateur, et enfin, pour les objets dont la distance est

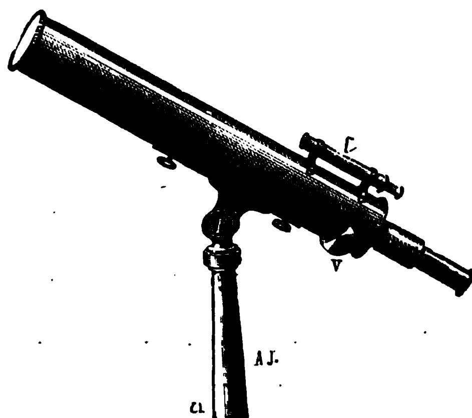


Fig. 185. — Lunette astronomique avec chercheur, montée sur un pied ordinaire.

comparativement rapprochée, de l'éloignement de ces objets mêmes. Pour tous les objets célestes, dont la distance peut être considérée comme infinie, la mise au point est seulement relative au grossissement c'est-à-dire à l'oculaire employé, et à la vue de l'observateur, qui peut être normale, myope ou presbyte.

A l'instrument est adapté un chercheur *l*, petite lunette fixée parallèlement à la lunette principale et munie, à son foyer, de deux fils croisés à angle droit. Le grossissement de la lunette étant un peu fort, le champ est très-limité, de sorte qu'en se servant de la lunette principale pour viser un objet, on a quelque difficulté à amener cet objet dans le champ de la lunette. Le champ du chercheur étant comparativement très-grand, on y trouve facilement l'objet, on l'amène au point de croisée des

fils, et l'on est assuré que l'objet observé, ou du moins sa partie centrale, est en ce moment dans le champ de la lunette principale.

La grande lunette porte elle-même un système de fils réticulaires mobiles, dont on règle la position de façon que l'image des fils soit nette, ce qui arrive quand le réticule est à la distance de la vision distincte. C'est en ce même point que doit

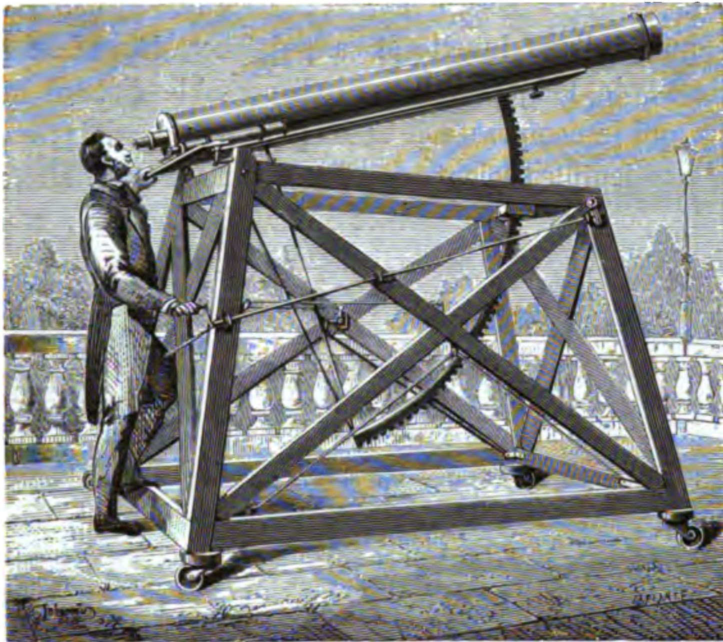


FIG. 186. — Lunette astronomique montée sur un pied à engrenages.

se trouver l'image réelle formée par l'objectif, et l'on y parvient, comme nous venons de le dire plus haut, en enfonçant plus ou moins le tube porte-oculaire.

Les lunettes à longs foyers des observatoires astronomiques sont d'un poids qui rend le maniement de ces instruments difficile. On leur adapte alors une monture plus compliquée, et, par l'intermédiaire d'engrenages et de tringles que nous n'avons point ici à décrire, on parvient à leur imprimer tous les mouvements nécessaires avec la lenteur et la précision convenables.

D'après ce que nous avons dit plus haut du grossissement d'une lunette astronomique, il semble qu'il dépende, pour un même instrument, ou mieux pour un même objectif, de l'oculaire. Et, en effet, une même lunette peut être susceptible de donner des grossissements variables par l'emploi d'oculaires différents, à foyers plus ou moins courts. Théoriquement parlant, la puissance d'une lunette semblerait donc illimitée; mais, à la vérité, elle dépend d'autres éléments dont nous allons dire un mot.

La qualité d'une lunette et sa puissance dépendent principalement de l'objectif. Il est indispensable d'abord que la matière qui le compose soit aussi pure que possible, que les verres des lentilles soient exempts de bulles et de stries. La taille et le polissage de la surface ont une importance non moins grande, et c'est de leur perfection que dépend surtout la netteté de l'image réelle que l'objectif forme à son foyer.

Maintenant, à égalité de perfection à ces divers points de vue, l'objectif qui supportera le grossissement le plus fort sera celui dont le diamètre sera le plus considérable, et dont la distance focale sera la plus grande. En effet, la clarté de l'image virtuelle dépend d'abord de l'éclat de l'image réelle, et, par conséquent, de la quantité des rayons lumineux qui contribuent à former cette dernière. Or, cette quantité est en rapport direct avec la grandeur ou l'ouverture de l'objectif. Comme le grossissement de l'oculaire éparpille les rayons sur un plus grand espace, l'image virtuelle est d'autant plus affaiblie et confuse que ce grossissement est plus fort, à moins que les rayons ne proviennent d'un point lumineux de dimension insensible et brillant d'une lumière propre comme les étoiles. En ce cas, l'affaiblissement provenant du grossissement est nul, et l'éclat est accru dans le rapport des carrés des ouvertures de l'objectif et de la pupille de l'œil. Aussi, avec une lunette d'une grande ouverture, le nombre des étoiles qu'on peut apercevoir dans une étendue limitée du ciel s'agrandit-il considérablement, comme le montrent les figures 187 et 188. L'une montre un coin

du ciel pris dans la constellation où les étoiles, vues à l'œil nu, sont au nombre de sept; à l'aide d'une lunette de 27 centimètres d'ouverture, M. Chacornac y a compté 3205 étoiles. En admettant 6 millimètres pour l'ouverture de la pupille, l'éclat se trouvait en effet augmenté dans le rapport de 36 à 72 900 ou de 1 à 2025, abstraction faite de l'absorption de la lumière par la matière des lentilles.



Fig. 187. — Un coin de la constellation des Gémeaux, vu à l'œil nu.

Ainsi encore s'explique la possibilité de distinguer en plein jour, avec les lunettes, des étoiles qu'on ne peut voir à l'œil nu que le soir ou pendant la nuit.



Fig. 188. — La même partie du ciel vue avec une lunette de 27 centimètres d'ouverture.

Les astres non lumineux par eux-mêmes, comme la Lune, les planètes, ont, dans les lunettes astronomiques, un éclat moindre qu'à l'œil nu, et il en résulte que le pouvoir grossissant est limité pour un objectif donné.

Parmi les plus remarquables et les plus puissantes lunettes astronomiques aujourd'hui connues, il faut citer celles des observatoires de Paris et de Poulkowa, qui ont 38 centimètres d'ouverture et 8 mètres de foyer, et celle de l'observatoire de Cambridge (États-Unis), dont l'ouverture mesure 47 centimètres. Ce dernier instrument est le plus grand télescope réfracteur qu'on ait construit jusqu'à présent [1].

§ III — Lunette terrestre ou Longuevue

C'est à Képler qu'on doit la découverte théorique de la lunette astronomique ou à oculaire convergent; mais le grand

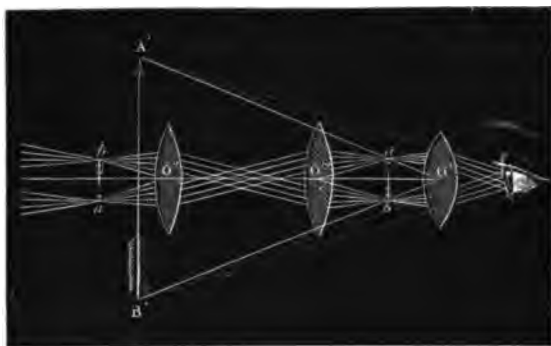


Fig. 189. — Marche des rayons lumimeux dans la lunette terrestre.

astronome ne réalisa point sa conception, et c'est le P. Scheiner qui fit le premier construire une lunette de ce genre, dont l'usage se substitua peu à peu à celui de la lunette de Galilée. Peu après, Reita inventa la *lunette terrestre* ou *lunette de jour*, qui ne diffère de la lunette astronomique que par la composition de l'oculaire. A l'aide de deux lentilles convergentes

1. On parle en ce moment d'un télescope réfracteur dont la lentille aurait un diamètre de $0^m,635$; cet instrument se construit en Angleterre. M. Alvan Clark, le constructeur de la grande lunette de Cambridge, a entrepris l'exécution d'une lentille de $0^m,69$. Si le succès couronne cette tentative hardie, c'est encore l'Amérique qui aura, sous ce point de vue, la suprématie.

de même foyer, $O''O'''$, situées entre le système O' de l'oculaire astronomique et l'image réelle de l'objectif, *ab*, l'image virtuelle *a'b'* est redressée, comme il est aisé de s'en rendre compte en suivant sur la figure 189 la marche des rayons lumineux. On voit alors que le système oculaire de la lunette terrestre se trouve formé de trois ou quatre lentilles.

L'avantage de cette combinaison est le redressement des images qui, pour les objets terrestres, est nécessaire. L'inconvénient est dans l'affaiblissement de l'éclat, qui ne permet plus, avec un même objectif, d'employer un grossissement aussi fort. La lumière absorbée par le passage à travers deux nouvelles lentilles est la cause de cet affaiblissement, qui n'existe pas dans la lunette de Galilée.

On construit aujourd'hui des lunettes ou longuevues de toute dimension et de puissances extrêmement variées, aussi bien en vue des applications utiles que pour la distraction et l'agrément. Avant l'invention du télégraphe électrique, les employés des télégraphes aériens se servaient, pour distinguer nettement les signaux, de longuevues dont les objectifs avaient jusqu'à 8 ou 9 centimètres d'ouverture et $2^m,50$ de distance focale. Les marins emploient des lunettes semblables, de dimensions moindres cependant, parce que le maniement en serait peu commode à bord; les *lunettes de nuit*, dont ils font un fréquent usage, sont, soit des lunettes à oculaire simple comme les lunettes astronomiques, soit à objectif de grand diamètre, afin de donner le plus possible de lumière et de permettre l'observation des objets dans l'obscurité.

Pour les maisons de campagne, on construit des lunettes plus puissantes, parce qu'on peut les installer à demeure sur des pieds de formes variées; elles sont munies d'un certain nombre d'oculaires, les uns terrestres, les autres astronomiques, de grossissements différents et qui permettent aux gens du monde, aux amateurs d'astronomie, de faire une série assez nombreuse d'observations intéressantes.

Quant aux instruments d'astronomie proprement dits, ils

exigent une perfection qui en rend l'acquisition relativement coûteuse. L'objectif principalement demande, outre la pureté de la matière, un travail de taille et de polissage long et difficile, sans lequel la netteté des images et leur achromatisme ne peuvent être obtenus. Aussi est-il nécessaire de les soumettre à des essais suivis, faits par des yeux exercés et accoutumés aux observations célestes. D'ordinaire, on les applique à distinguer certains objets célestes d'une observation difficile. à dédoubler quelques étoiles, à reconnaître les détails de structure, soit de certaines nébuleuses, soit des anneaux de Saturne, à apercevoir nettement les satellites de cette planète. Au contraire, d'autres objets se voient bien dans presque tous les instruments : telle est la Lune, pour laquelle, comme on l'a dit, il n'est point de mauvaise lunette.

Mais il faut se garder des forts grossissements, sauf pour les étoiles ou les nébuleuses. Un grossissement moyen, qui donne beaucoup de clarté et de netteté, est bien préférable aux amplifications exagérées qu'on applique trop souvent aux instruments, sans utilité réelle.

§ IV — Les Télescopes catadioptriques

Un télescope réflecteur ou catadioptrique, ou plus simplement, selon l'usage de notre langue, un télescope, diffère des lunettes ou télescopes réfracteurs, en ceci, que l'objectif est un miroir concave au lieu d'une lentille convergente. Ce miroir donne lieu à la formation d'une image réelle de l'objet, image qui est située au foyer principal du miroir quand l'objet est à une distance qu'on peut considérer comme infinie. En disposant convenablement un oculaire pour l'examen de cette image, on obtient l'amplification qu'on désire, comme dans la lunette astronomique.

Cette substitution d'un miroir à la lentille objective avait été imaginée dès 1616 par Zucchi. Mais c'est à l'astronome anglais

Gregory que revient le mérite de la première application effective, et l'on peut dire de l'invention du télescope. Mais, comme on va le voir plus loin, l'image de l'objet qu'on grossit à l'aide de l'oculaire est formée après une double réflexion sur un grand, puis sur un petit miroir concaves, d'où résulte une assez grande déperdition de lumière. Newton imagina une disposition différente dans laquelle la réflexion a lieu aussi sur deux miroirs, et enfin William Herschel a supprimé complétement la seconde réflexion dans les télescopes à grande ouverture qui portent son nom. Commençons donc par ce dernier système, le plus simple de tous.

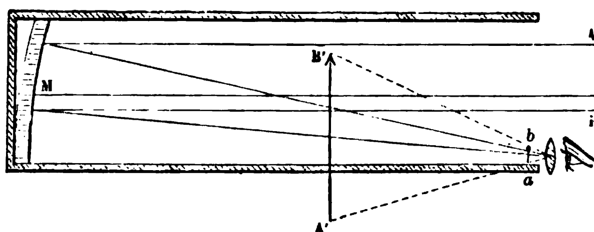


FIG. 190. — Principe et disposition du télescope *front-view* de W. Herschel.

Un miroir concave M disposé au fond du tube de l'instrument reçoit les rayons qui émanent de l'objet céleste AB, et, par la réflexion, donne lieu à la formation d'une image aérienne ou réelle *ba*, renversée. A l'aide de l'oculaire O disposé en avant du foyer principal de l'objectif et sur le bord inférieur du tube du télescope, l'œil voit l'image B'A' agrandie, mais toujours renversée, ce qui est sans inconvénient pour les observations astronomiques.

Cette disposition n'est possible que pour les télescopes dont le miroir a une très-grande ouverture. L'image doit se former sur le bord du tube, afin que la tête de l'observateur qui tourne le dos à la partie du ciel observée, n'intercepte que fort peu de rayons. De là, la disposition légèrement inclinée, relativement à l'axe du tuyau, donnée au miroir. Dans un très-grand télescope, la portion de la tête qui empiète sur l'ouverture du tube est une petite

fraction de la surface du miroir; il n'en serait point ainsi dans un télescope de faibles dimensions.

Les télescopes de ce système sont connus sous le nom de *télescopes front-view*, ou *à vue de face*, que leur avait donné W. Herschel lui-même. Le plus considérable que l'illustre astronome de Slough ait construit sur ce modèle est celui dont la

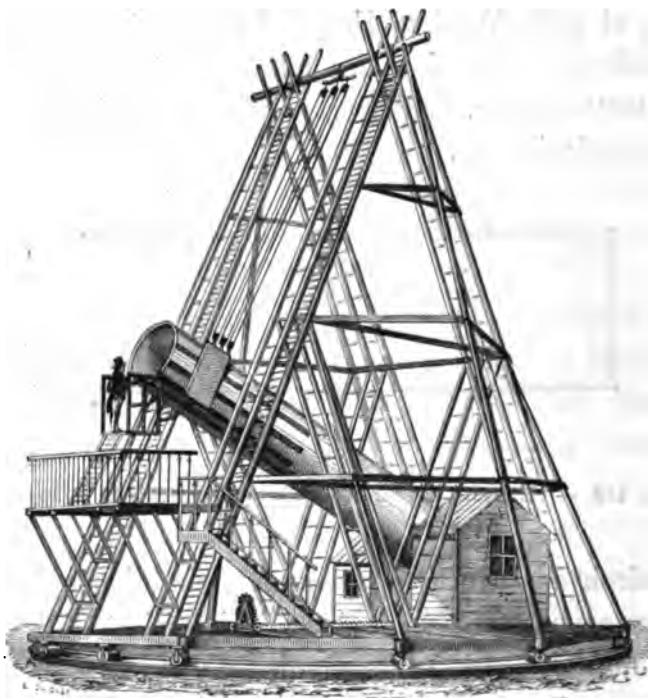


FIG. 191. — Grand télescope *front-view* de W. Herschel, à l'observatoire de Slough.

figure 191 donne la vue extérieure. Il n'avait pas moins de 39 pieds 4 pouces anglais de longueur (13 mètres), et le miroir avait un diamètre de 4 pieds 10 pouces ($1^m,47$). « De telles dimensions, dit Arago, sont énormes, comparées à celles des télescopes exécutés jusque-là. Elles paraîtront cependant très-mesquines aux personnes qui ont entendu parler d'un prétendu bal donné dans le télescope de Slough. Les propagateurs de ce bruit populaire avaient confondu l'astronome Herschel avec le brasseur Meux, et un cylindre dans lequel l'homme de plus

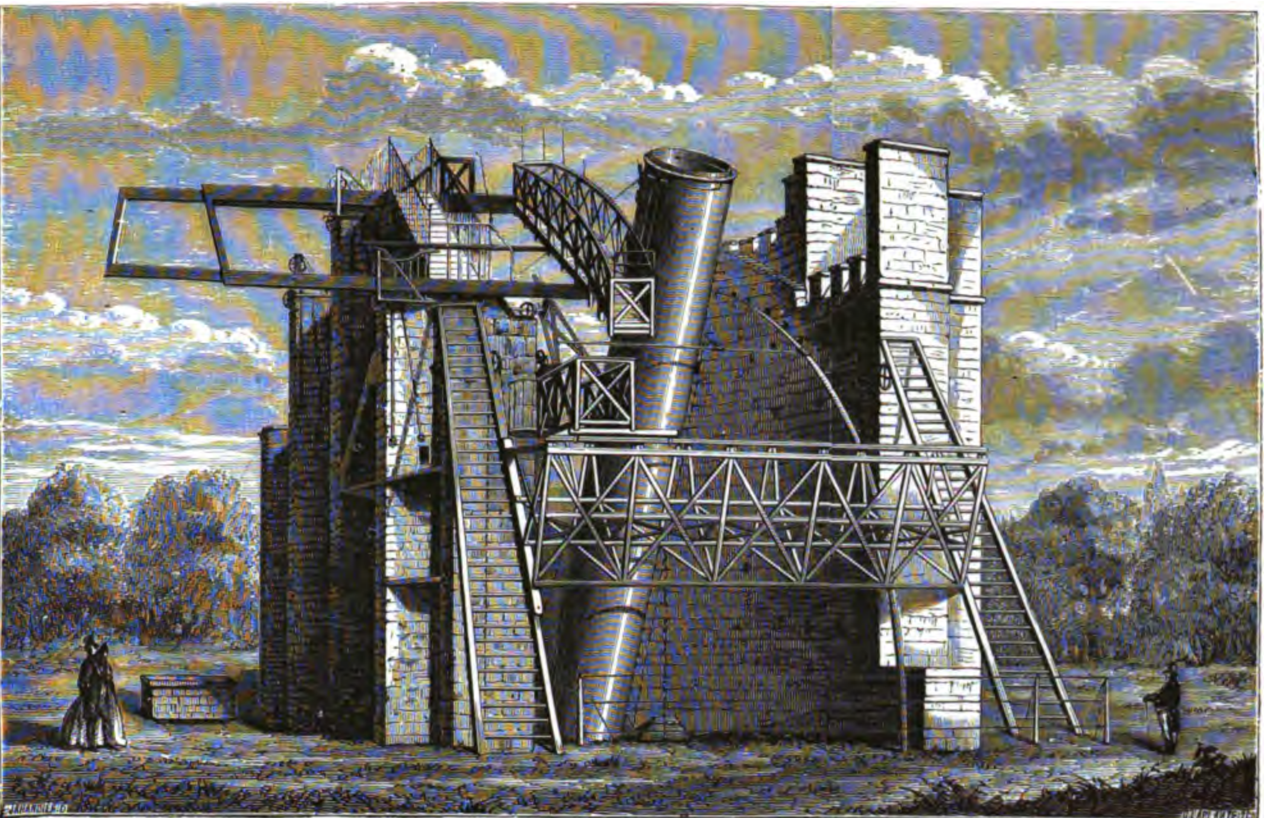


PLANCHE XII — GRAND TÉLESCOPE DE LORD ROSSE

A Parsonstown (Irlande)

petite taille pourrait à peine se tenir debout, avec certains tonneaux de bois, grands comme des maisons, où l'on fabrique, où l'on conserve la bière. »

Cet immense télescope, qui ne pesait pas moins de 20 quintaux anciens, n'était pas facile à mouvoir. Il fallut une combinaison d'ailleurs fort ingénieuse de mâts, de poulies, de cordages pour la manœuvre, qui exigeait le concours continuel de deux hommes de peine, outre l'aide chargé de prendre l'heure à la pendule. D'ailleurs, l'observation avec d'aussi puissants instruments nécessite un ciel d'une grande pureté, sans quoi le grossissement des irrégularités apparentes provenant des réfractions atmosphériques déforme les images et les rend confuses. « Herschel trouvait qu'en Angleterre il n'y a pas dans l'année plus de cent heures pendant lesquelles on puisse observer fructueusement le ciel avec un télescope de 39 pieds, armé d'un grossissement de 1000 fois. Cette remarque conduisit le célèbre astronome à reconnaître que, pour faire avec son instrument une revue du ciel tellement combinée, que le champ eût été dirigé un seul instant vers chaque point de l'espace, il ne faudrait pas moins de huit cents ans. »

Le télescope que lord Rosse a fait construire et installer dans son parc de Parsonstown, en Irlande, est plus colossal encore que l'instrument déjà énorme d'Herschel. Le miroir métallique, de $1^{m},83$ de diamètre, de 17 mètres environ de distance focale, pèse à lui seul près de 4000 kilogrammes. Le poids total de l'appareil optique, tube et miroir, n'est pas moindre de 10400 kilogrammes. Il supporte des grossissements de 6000 fois. Mais une telle puissance d'amplification n'est applicable qu'à l'observation des objets très-lumineux, comme les étoiles ou certaines nébuleuses. La Lune, les planètes, qui n'envoient qu'une lumière réfléchie, ne peuvent être utilement examinées; aussi est-ce aux recherches d'astronomie sidérale que ce magnifique instrument a été appliqué avec le plus de succès. Nous avons donné, dans notre ouvrage Le Ciel, de nombreux échantillons d'images d'amas stellaires et de nébuleuses observés la plupart

à Parsonstown, à l'aide du grand télescope que représente la planche XII.

Arrivons maintenant au télescope de Gregory. Au foyer principal du grand miroir objectif MM placé au fond du tube de l'instrument, il se forme une image aérienne, réelle et renversée, de l'objet céleste AB. En sens inverse du grand miroir et sur le même axe, se trouve disposé un petit miroir concave *m*. L'image réelle est un objet pour ce second miroir; il s'en forme donc une seconde image réelle aussi et renversée en *ab*, de sorte que celle-ci est une image droite de l'objet véritable, qui se trouve

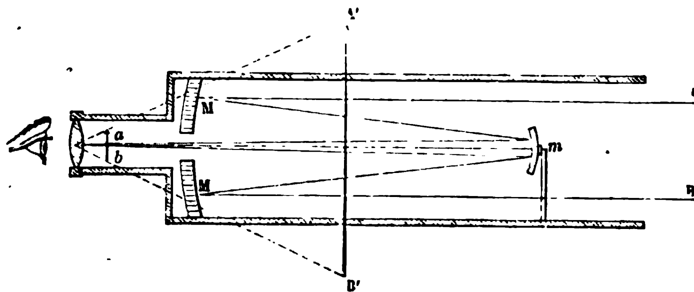


FIG. 192. — Principe et disposition du télescope de Gregory.

agrandie par l'oculaire en A'B'. Pour donner issue aux faisceaux de lumière qui la composent, le grand miroir est percé à son centre d'une ouverture, vis-à-vis de laquelle s'adapte le tuyau de l'oculaire, de sorte que l'observateur a l'œil directement tourné vers la partie du ciel observée, comme dans la lunette astronomique. Il n'intercepte donc pas la lumière qui tombe sur l'objectif. Cette lumière est affaiblie toutefois, d'abord par l'ouverture pratiquée au centre, qui en diminue la surface, mais surtout par la seconde réflexion à la surface du petit miroir. C'est là qu'est l'inconvénient des télescopes de Gregory, dont le principal avantage vient de la facilité avec laquelle se font les recherches, sans toutefois que cela dispense de la nécessité d'une petite lunette parallèle ou chercheur.

Dans les télescopes de Gregory, l'image agrandie A'B' est

droite, ce qui permet d'employer cet instrument comme lunette terrestre. A l'aide d'une tringle extérieure, on peut déplacer le petit miroir, de manière à mettre au point : pour les myopes, on rapproche le miroir de l'oculaire ou de l'œil; pour les presbytes, on l'éloigne au contraire. La mise au point est aussi



FIG. 193. — Télescope de Gregory.

nécessaire, quand, d'une observation ou d'un objet situé à l'infini, on passe à une observation terrestre d'un objet plus ou moins éloigné de l'observateur.

Le télescope de Cassegrain est à peu près disposé comme celui de Gregory. Il a les mêmes inconvénients et les mêmes avantages, outre qu'il est un peu plus court. Cela tient à ce que le petit miroir, étant convexe, doit être placé en avant de l'image réelle que formerait le grand miroir.

Il nous reste à décrire le télescope imaginé par Newton. Le miroir *m* qui reçoit les faisceaux lumineux émanés de l'objectif M

s'y trouve placé, comme dans le télescope de Cassegrain, en avant du foyer principal où viendrait se former l'image réelle de l'objet. Mais c'est un miroir plan incliné à 45°, de sorte qu'il ne fait que renvoyer l'image, égale à la première, dans une direction qui est à angle droit avec celle des rayons de lumière ou avec l'axe de l'instrument. Une ouverture est pratiquée latéralement dans cette direction, et c'est là qu'on place le tuyau de l'oculaire, de manière à examiner l'image agrandie.

Au lieu d'un miroir plan, on met le plus souvent un prisme rectangulaire, et c'est sur la face hypoténuse que viennent tom-

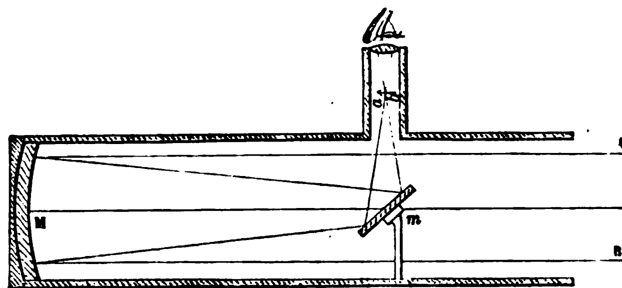


FIG. 194. — Principe et disposition du télescope de Newton.

ber les rayons réfléchis par l'objectif. Ils sont eux-mêmes renvoyés à l'oculaire par le phénomène connu sous le nom de réflexion totale.

W. Herschel a construit, pour ses propres observations, un grand nombre de télescopes; il en travaillait et polissait lui-même les miroirs, et était devenu très-habile dans ces opérations ordinairement longues et délicates. Voici, à ce sujet, quelques détails intéressants que nous empruntons à l'excellente notice publiée par François Arago sur les travaux du grand observateur de Slough :

« Avant d'avoir trouvé des moyens directs, certains, de donner aux miroirs la forme de sections coniques, il fallait bien qu'Herschel, comme tous les opticiens ses prédécesseurs, cherchât à atteindre le but en tâtonnant. Seulement ses essais étaient

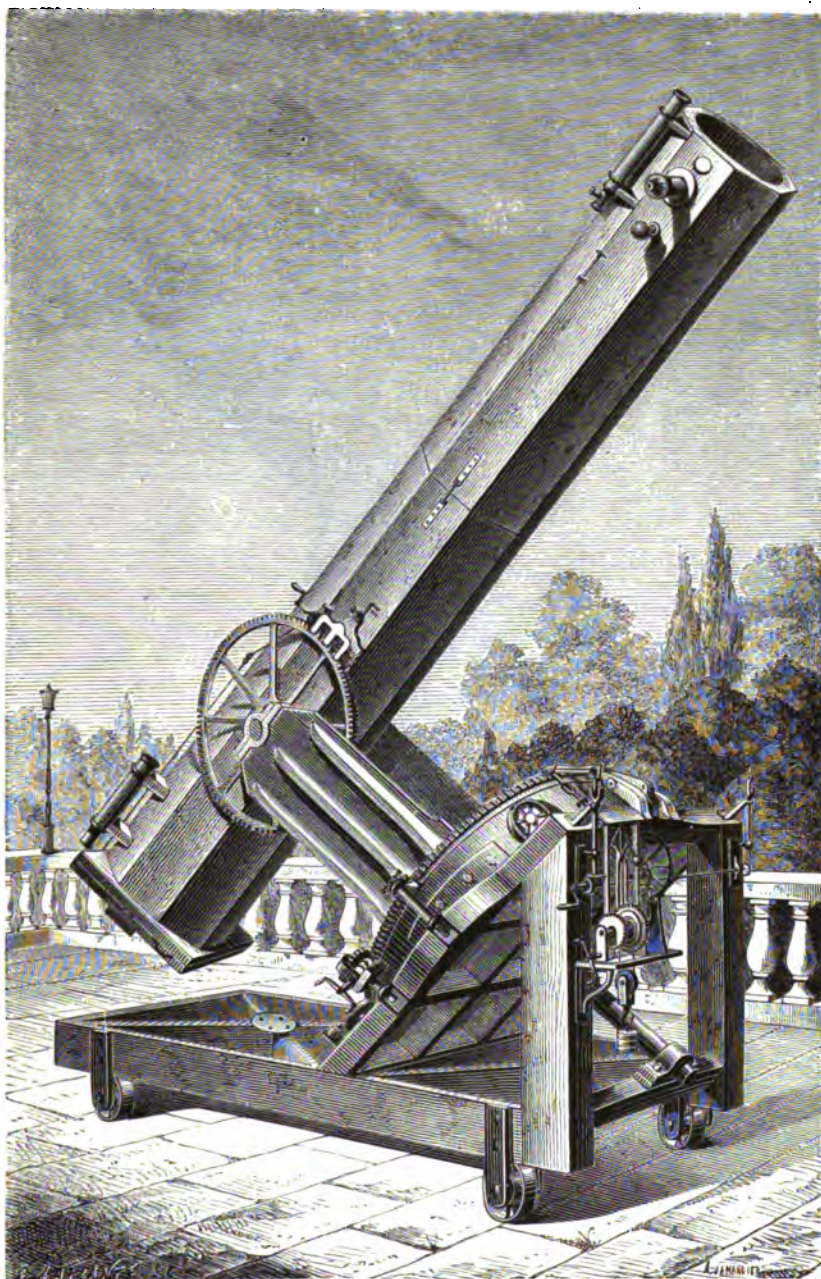


PLANCHE XIII — TÉLESCOPE A MIROIR ARGENTÉ DE L. FOUCAULT

Système newtonien

dirigés de telle sorte qu'il ne pouvait y avoir de pas rétrograde. Dans son mode de travail, le mieux, quoi qu'en dise un ancien adage, n'était jamais l'ennemi du bien. Quand Herschel entreprenait la construction d'un télescope, il fondait [1] et façonnait



Fig. 195. — Télescope à miroir argenté de Léon Foucault (système newtonien).

plusieurs miroirs à la fois : dix, par exemple. Celui de ces miroirs auquel des observations célestes faites dans des circonstances favorables assignaient le premier rang, était mis de côté, et l'on retravaillait les neuf autres. Lorsqu'un de ceux-ci

1. Le métal avec lequel on fabrique les miroirs de télescope est du bronze composé de 67 de cuivre et de 33 d'étain. Cet alliage a une nuance jaunâtre et est susceptible d'acquérir un très-beau poli. On y ajoute quelquefois de faibles proportions de laiton, d'argent, d'arsenic et aussi de platine.

devenait fortuitement supérieur au miroir réservé, il en prenait la place jusqu'au moment où, à son tour, un autre le primait, et ainsi de suite. Est-on curieux de savoir sur quelle large échelle marchaient ces opérations, même à l'époque où, dans la ville de Bath, Herschel n'était qu'un simple amateur d'astronomie? Il fit jusqu'à deux cents miroirs newtoniens de 7 pieds anglais ($2^m,13$) de foyer; jusqu'à cent cinquante miroirs de 10 pieds ($3^m,05$), et environ quatre-vingts miroirs de 20 pieds ($6^m,096$).

» Chaque fois qu'Herschel entreprend de polir un miroir de télescope, dit Lalande, il en a pour dix, douze, quatorze heures d'un travail continu. Il ne quitte pas un instant, même pour manger, et reçoit de la main de sa sœur les aliments sans lesquels on ne pourrait supporter une si longue fatigue : pour rien au monde Herschel n'abandonnerait son travail; suivant lui, ce serait le gâter. »

Les télescopes à miroirs métalliques offrent de graves inconvénients : outre le poids énorme de l'objectif, dès que l'ouverture atteint des dimensions un peu considérables, ils ont le défaut d'exiger assez fréquemment le polissage des réflecteurs, qui se ternissent sous l'influence de l'humidité atmosphérique. Le polissage est lui-même une opération délicate, puisqu'elle peut altérer la courbure du miroir.

Léon Foucault est arrivé à conserver au télescope son principal avantage sur les lunettes astronomiques, qui est l'absence d'aberration de réfrangibilité, tout en diminuant considérablement, à ouverture égale, le poids de l'objectif, et en rendant la courbure du miroir à peu près inaltérable. Pour cela, il a substitué des miroirs de verre aux miroirs métalliques, et il les a rendus exempts d'aberration de sphéricité, en les travaillant par une méthode spéciale, jusqu'à ce qu'ils aient une forme parabolique à peu près parfaite.

D'autre part, il a augmenté le pouvoir réfléchissant du miroir en argentant la surface. A l'aide d'une dissolution de nitrate d'argent ammoniacal dans l'alcool, on peut, à la température

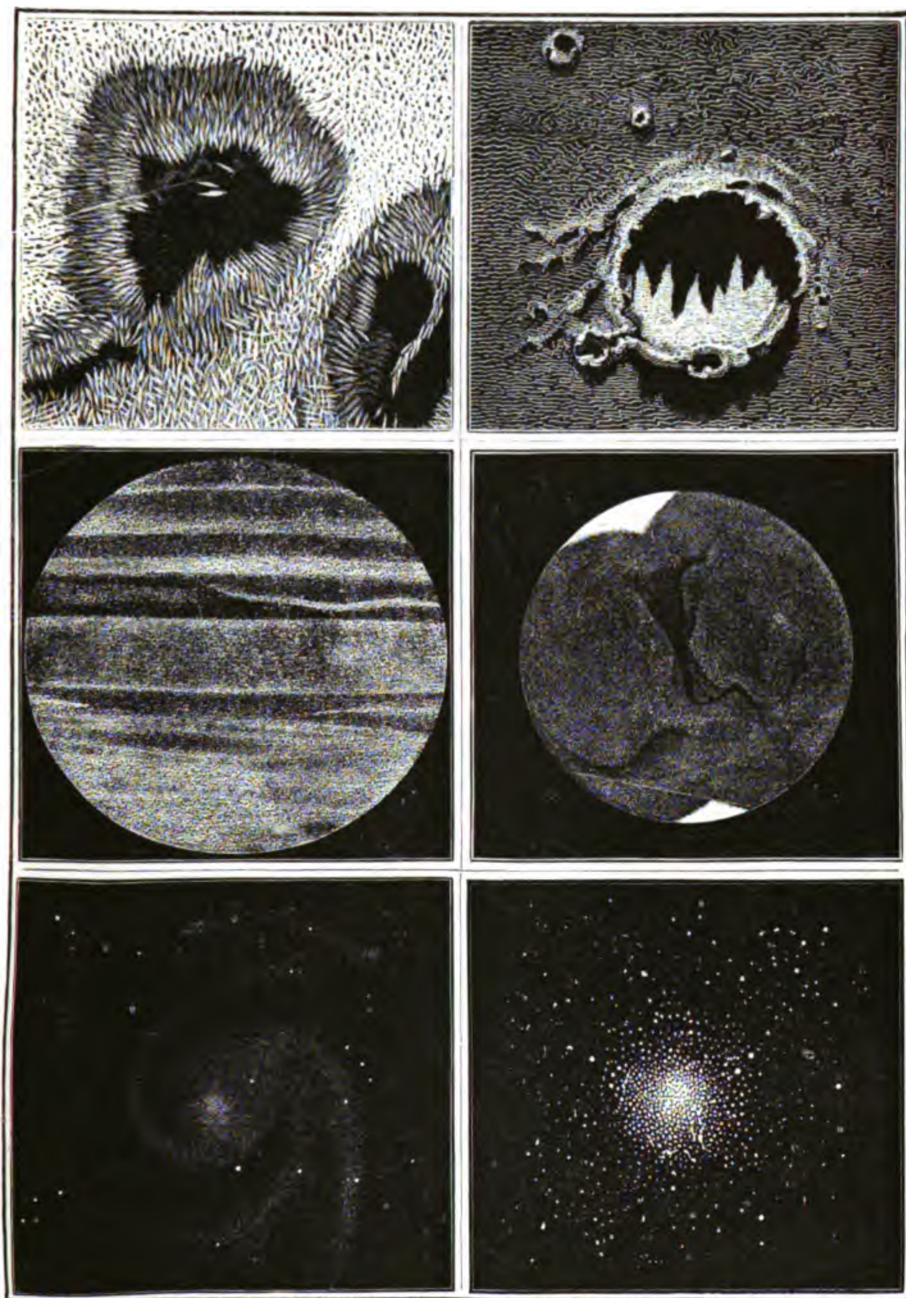


PLANCHE XIV — LE TÉLESCOPE APPLIQUÉ A L'ÉTUDE DU CIEL

1. Taches solaires. — 2. Cratères lunaires. — 3. La planète Jupiter avec ses bandes. — 4. Taches de Mars, ses pôles, ses continents et ses mers. — 5. Une nébuleuse. — 6. Amas d'étoiles.

ordinaire, recouvrir cette surface d'une double pellicule métallique, qu'on renouvelle aisément quand elle s'altère par l'usage, sans nuire en rien à la forme géométrique du miroir.

Un instrument de ce genre, disposé d'après le système newtonien, et monté parallactiquement, de manière à pouvoir suivre le mouvement d'un astre, d'une planète, d'une nébuleuse, à mesure que l'entraîne le mouvement diurne, a été construit par l'habile physicien en 1862, et envoyé à l'observatoire de Marseille, où il a rendu à l'astronomie physique des services signalés (voyez la planche XIII). L'objectif n'a pas moins de 80 centimètres d'ouverture (78 de diamètre utile) et $4^{m},50$ de longueur focale principale. L'oculaire n'est autre chose qu'un microscope composé, de façon que l'image soit totalement exempte d'aberration.

On construit des télescopes à miroir argenté de petites dimensions qui supportent des grossissements de 60 à 200 fois. Tel est celui dont la figure 195 représente le modèle, dont le miroir a 10 centimètres de diamètre, et 60 centimètres seulement de distance focale. Avec un semblable instrument, les amateurs d'astronomie peuvent dédoubler nombre d'étoiles, observer les satellites de Jupiter, l'anneau de Saturne, les taches du Soleil, et reconnaître des détails fort intéressants dans les montagnes lunaires.

Si l'on voulait se faire une juste idée des importants services que l'invention des télescopes a rendus depuis deux siècles aux sciences d'observation et notamment à l'astronomie, c'est l'histoire même de ces sciences qu'il faudrait lire : à chaque page, on s'arrêterait émerveillé devant la grandeur des résultats. Mais ce ne sont pas seulement les curiosités, les merveilles du ciel qu'il faudrait passer en revue ; ce n'est pas seulement la profondeur des espaces infinis où brillent les systèmes d'étoiles et les nébuleuses qu'il faudrait explorer. Il faudrait encore et surtout insister sur les progrès que l'usage de ces instruments a fait faire à l'astronomie de précision, et par là aux théories sublimes qui expliquent aujourd'hui toutes les lois des mouvements

célestes, en considérant l'univers entier comme un système de corps et de forces réagissant les uns sur les autres, système offrant aux géomètres, sur une échelle infinie, l'application la plus admirable des théorèmes de la mécanique rationnelle.

Nous avons rassemblé dans la planche XIV quelques échantillons des détails que le télescope permet de voir sur le Soleil, la Lune et les planètes, et dans les mondes plus lointains des amas d'étoiles ou des nébuleuses.

CHAPITRE V

LE STÉRÉOSCOPE

§ I — La Vision en relief — Le Stéréoscope de réflexion de Wheatstone

Quand nous examinons, sans autre secours que celui de nos yeux, un paysage, un arbre, un monument, nous n'avons pas seulement la sensation d'un tableau, c'est-à-dire d'une représentation plane des objets qui viennent se peindre chacun sur notre rétine. Nous avons en outre l'impression, très-nette et très-vive, du relief des objets, de leurs distances inégales, des intervalles qui les séparent : la profondeur de l'espace est une sensation intuitive résultant tout simplement du phénomène normal de la vision.

Pourquoi les tableaux peints, quel que soit le mérite de l'artiste auquel ils sont dus, quelle que soit la fidélité de la perspective, des contours des objets, du coloris et de ses nuances, ne produisent-ils pas une sensation pareille? C'est un grand et rare talent que celui de mettre de l'air dans un tableau, de la profondeur dans un paysage; mais, alors même que le peintre y a réussi, l'illusion du relief est loin d'égaler la nature.

Longtemps on ne s'est point rendu compte de cette différence

entre la représentation plane et la vue réelle, la vision en relief. Il y a cependant un moyen très-simple de trouver cette raison. Qu'après avoir observé la vue réelle avec les deux yeux, on vienne à l'examiner à l'aide d'un seul œil, celui de droite ou celui de gauche, à l'instant le relief, la sensation de la profondeur disparaît; du moins est-elle en grande partie atténuée. Le paysage réel semble une peinture dont les divers plans se confondent. Toutefois cette différence entre la vision ordinaire



FIG. 196. — Différence entre la vision monoculaire et la vision binoculaire.

ou binoculaire, et la vision monoculaire, est à peu près insensible pour les objets éloignés; elle est au contraire d'autant plus forte que les objets sont plus rapprochés; elle est maximum pour ceux qui sont au premier plan.

Ce premier point constaté, comment les choses se passent-elles quand on examine un objet en relief avec un œil seul? C'est ce que tout le monde peut vérifier de la manière la plus simple. Prenons pour exemple un cube, ce dé à jouer (fig. 196), ou cette pyramide quadrangulaire.

Plaçons-les l'un et l'autre dans le plan qui passe par la ligne médiane des deux yeux, et regardons-les chacun avec les

deux yeux : les deux figures A et B représenteront les deux objets vus de cette façon. Fermons l'œil gauche, l'aspect changera. Du dé A′, la face latérale de droite paraîtra plus grande, tandis que celle de gauche aura disparu ; les faces latérales de la pyramide B′ seront d'inégale grandeur apparente. Fermons au contraire l'œil droit, l'inverse aura lieu, comme le montrent les images A″ et B″.

On peut faire mille expériences semblables sur les objets plus ou moins éloignés qu'on a devant soi. On reconnaîtra que la vue, avec l'œil droit seul, découvre des parties qui restent cachées quand on examine avec l'œil gauche unique. Il faut conclure de là qu'une image différente du même objet se peint sur chaque rétine, droite ou gauche, de sorte qu'il paraîtrait devoir en résulter, pour la vision binoculaire, une double image. Or, l'expérience prouve qu'il n'en est pas ainsi, que ces deux images se superposent et ne donnent qu'une sensation simple, où les parties différentes des images composantes se trouvent réunies. La vue complète ou normale enveloppe pour ainsi dire les objets en relief, et cela d'autant plus qu'ils sont plus rapprochés.

Qu'on joigne à cela la nécessité de l'accommodation de l'œil pour la vision nette suivant les circonstances, et l'on comprendra la différence que nous avons plus haut constatée entre la sensation que produit la vue binoculaire des objets réels et la sensation donnée par le tableau le mieux rendu qui représente les mêmes objets. Dans ce dernier cas, c'est toujours la même image qui est peinte sur les deux rétines, et la vision en relief, la *vision stéréoscopique* (des deux mots grecs στερεὸς, solide, et σκοπεῖν, voir,) est impossible.

C'est à l'analyse de ces phénomènes qu'est due l'invention des instruments d'optique auxquels on donne le nom de *stéréoscopes*. Un célèbre physicien anglais, M. Wheatstone, est le premier qui ait eu cette idée et qui l'ait réalisée dans le petit appareil qui porte le nom de *stéréoscope de réflexion*.

En voici la disposition très-simple. M et M′ sont deux miroirs

disposés verticalement à angle droit sur une planchette rectangulaire, de manière à former avec les bords de cette planchette des angles de 45°. Deux montants latéraux A et A′ sont munis de glissières et peuvent recevoir ainsi deux images du même objet, de la même vue, de la même scène ou tableau. Il est évident que ces images vont se reproduire dans chacun des miroirs, et former deux images virtuelles en apparence placées derrière chaque miroir symétriquement par rapport à l'objet lui-même. Ainsi *ab* donnera lieu à l'image a_1b_1 ; les deux mêmes points $a'b'$ de l'objet de droite formeront une image $a'_1b'_1$, qui se superposera exactement sur la première.

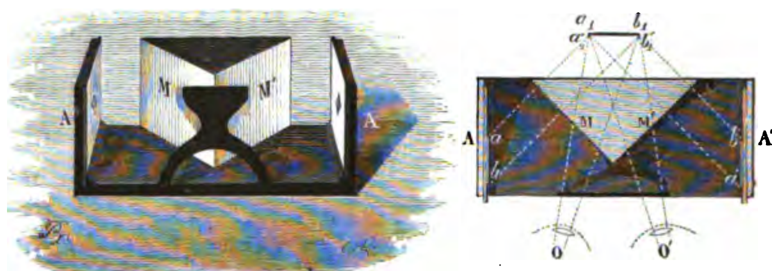


Fig. 197. — Stéréoscope de réflexion de Wheatstone.

Si donc les deux yeux OO′ sont placés vis-à-vis de chaque miroir, et si un diaphragme empêche chacun d'eux de voir l'image produite sur le miroir d'à côté, les deux images a_1b_1 et $a'_1b'_1$ sembleront partir des mêmes points de l'espace; elles se peindront sur les rétines de chaque œil, comme le ferait la vue d'un objet réel. Maintenant, que faut-il pour qu'il y ait identité complète entre les phénomènes de vision dans le cas de l'objet réel ou en relief, et du même objet, simple tableau? C'est que les deux vues séparées soient précisément celles que recevrait chacun des deux yeux, s'il examinait chacune d'elles du point de vue où s'est placé l'artiste.

C'est là une condition essentielle de la vision stéréoscopique; si elle est réalisée, la superposition des images se fera comme dans la nature même. On aura devant soi, non plus seulement

une représentation plane, mais une vision en relief, d'autant plus saisissante et plus vive, que les tableaux seront reproduits avec une fidélité plus grande, avec les détails des ombres et de leurs nuances.

Si les couleurs n'y sont point, on croira voir des objets de marbre, une véritable reproduction sculpturale de la nature.



Fig. 198. — Épreuves stéréoscopiques. Fac-simile d'une photographie représentant une salle du musée du Louvre.

Le *stéréoscope de réflexion* de Wheatstone n'a pas tardé à être modifié, ou du moins le principe de son exécution a été l'objet d'un instrument plus commode, plus parfait, dont l'invention est due à un de ses compatriotes, M. Brewster, et qui a été perfectionné lui-même par deux de nos opticiens les plus distingués, MM. Soleil et Dubosc.

Mais avant de décrire le stéréoscope de réfraction, disons un mot d'un procédé très-simple qui permet de réaliser la vision stéréoscopique des images. Il suffit, pour cela, de placer les deux dessins convenablement reproduits à côté l'un de l'autre, comme on le voit dans la figure 198, et d'interposer un diaphragme, un morceau

de papier ou de carton sur la ligne médiane, entre les deux yeux. Au bout de quelques secondes, les deux images se superposent et le relief apparaît. Toutefois c'est un exercice fatigant pour la vue, et les stéréoscopes, comme on sait aujourd'hui les construire, ont un avantage marqué sur ce procédé élémentaire de stéréoscopie.

§ II — Stéréoscope de réfraction de Brewster — Stéréoscope d'Helmholtz — Pseudoscope

Arrivons au *stéréoscope de Brewster*.

Ce n'est plus par la réflexion à la surface de deux miroirs qu'on examine les deux images, mais directement, en plaçant les deux yeux au devant de deux verres, de deux portions AA′ de prisme ou de lentille convergente.

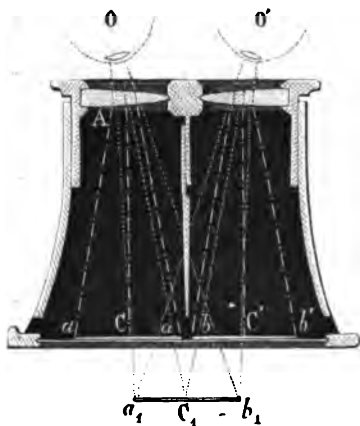


FIG. 199. — Stéréoscope de réfraction : coupe.

Un même point CC′ pris sur chaque vue stéréoscopique envoie un faisceau de lumière qui se réfracte dans chaque prisme et donne lieu à une image qui se forme au même point, au delà du plan du dessin, en C_1. Il en est de même pour toutes les parties correspondantes du tableau, de sorte que les deux vues stéréoscopiques se trouvent peintes simultanément en a_1b_1, celle de droite sur la rétine droite, celle de gauche sur la rétine gauche. La vision en relief en résulte avec une grande perfection, si surtout les images sont des reproductions photographiques exactes, rigoureusement prises des points de vue convenables et avec des conditions de lumière favorables.

Il importe d'éclairer également les deux images, ce qu'on obtient en portant le stéréoscope aux yeux dans une direction

normale à celle du jour, de façon que la lumière entre aussi vive de chaque côté du diaphragme par l'ouverture ménagée à cet effet. S'il s'agit de vues photographiques sur verre, il suffit de placer l'appareil en face de la lumière du jour ou de celle d'une lampe. Dans ce cas, la face postérieure du stéréoscope est garnie d'un verre dépoli qui laisse passer la lumière également tamisée et intercepte les images des objets extérieurs.

Le stéréoscope ne donne pas seulement la sensation du relief : il produit l'effet des lentilles convergentes ou des loupes, c'est-à-dire qu'il grossit les images, et, par conséquent, permet d'en étudier avec plus de netteté les détails. Dans ce but, et pour



Fig. 200. — Stéréoscope de réfraction : vue extérieure.

rendre encore le grossissement plus fort, on substitue aux prismes des combinaisons de lentilles, telles que celle représentée dans la coupe de la figure 201. Ce stéréoscope a été disposé par le docteur Helmholtz, professeur de physiologie à Heidelberg. Outre la modification apportée aux oculaires, il se distingue par un mécanisme spécial qui permet, soit de régler la distance des deux oculaires, soit d'augmenter ou de diminuer à volonté la distance des yeux ou des lentilles aux tableaux stéréoscopiques. Cette disposition est utile, parce que les images stéréoscopiques ne sont pas toujours placées de façon que la distance des points correspondants soit égale à celle des yeux, ou que leurs hauteurs au-dessus de la ligne de base soient égales. A l'aide des vis, on peut déplacer les oculaires dans leur plan, soit latéralement, soit de haut en bas. Le mou-

vement des tubes oculaires a pour objet d'amener les images photographiques aux foyers des lentilles.

Les monuments, les personnages, en un mot tous les objets saillants, se présentent dans les stéréoscopes avec une vérité de relief étonnante, qui fait complétement illusion. Mais, comme le remarque fort justement Helmholtz, « l'avantage de la vision



FIG. 201. — Stéréoscope d'Helmholtz.

stéréoscopique tombe surtout sous le sens en présence de reproductions d'objets qui se prêtent mal à la représentation par le dessin ou la peinture ordinaires : tels sont les rochers irréguliers, les blocs de glace, les objets microscopiques, les animaux, les forêts, etc. Les glaciers, en particulier, avec leurs fentes profondes éclairées par transparence à travers l'épaisseur de la glace, produisent un effet surprenant dans le stéréoscope. L'image unique donne ordinairement l'idée d'une agglomération

confuse de taches grises, tandis que la combinaison stéréoscopique fait ressortir de la manière la plus palpable les formes des blocs de glace, ainsi que les effets de la lumière transmise et de la lumière réfléchie. La difficulté vient d'abord de ce que des formes aussi irrégulières que celles des blocs de glace ne peuvent pas être rendues nettement, même lorsqu'elles sont éclairées simplement par de la lumière incidente; elle est attribuable davantage à ce que la lumière transmise par la glace modifie complétement les lois ordinaires des ombres. La représentation stéréoscopique d'objets brillants, tels qu'une eau ridée par quelques vagues légères, produit encore des effets très-surprenants. » (*Optique physiologique.*)

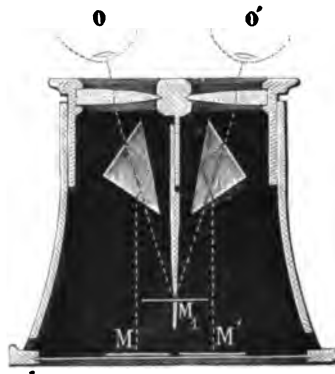


Fig. 202. — Le pseudoscope.

On construit des stéréoscopes dans lesquels les rayons partis des deux images, avant de pénétrer dans les prismes ou lentilles oculaires, subissent la réflexion totale à travers deux prismes à angle droit, dont la face hypoténuse (fig. 202) est disposée parallèlement à la direction des rayons qui arrivent dans les deux yeux. Il résulte de cette disposition que les deux images sont vues toutes deux symétriques de ce qu'elles sont dans la nature; elles se superposent, mais de telle façon que ce qui est à droite est vu à gauche, et réciproquement. Les images sont donc inverses, et, par suite, la perspective est aussi inverse, soit pour les reliefs, soit pour les creux. Les objets creux paraissent donc en relief et les reliefs en creux. Toutefois les ombres portées contrarient quelquefois cette illusion, ainsi que d'autres circonstances qui contribuent autant que la perspective ou les ombres à donner à la vision le sentiment du relief. Un exemple nous montrera la raison du renversement des images par le stéréoscope ainsi disposé, qui reçoit alors le nom de *pseudoscope*.

Considérons une pyramide tronquée vue d'en haut, et supposons que la lumière oblique ne donne pas d'ombre portée ; il y aura seulement des différences d'éclat dans les faces latérales. Les deux vues stéréoscopiques devront être disposées comme

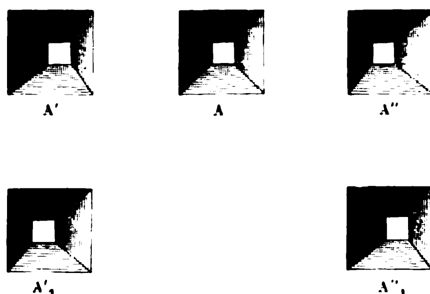


FIG. 203. — Vision stéréoscopique directe et inverse : relief et creux.

l'indiquent les dessins A' et A'', et alors ils donneront dans le stéréoscope le sentiment du relief. Mais, dans le pseudoscope,



FIG. 204. — Vision en relief et vision en creux : médaillon de Molière.

les deux dessins donnent des images symétriques et produisent l'effet que donneraient les deux vues stéréoscopiques A'_1 et A''_1. Or, ces images, qui se superposent par l'effet de l'appareil, sont des vues d'une pyramide semblable à la première, éclairée par la même lumière, mais qui serait creuse au lieu d'être en relief,

puisque dans l'œil droit c'est la face de gauche qui est agrandie par la perspective, et le contraire a lieu dans l'image destinée à l'œil gauche.

L'effet du pseudoscope se produit naturellement quand on regarde des dessins où des ombres sont bien marquées, comme on représente les médailles. Alors, tantôt on voit l'objet en creux, tantôt on le voit en relief. Nous croyons avoir remarqué qu'on obtient plus aisément à volonté l'une ou l'autre des sensations, si l'on a soin de placer convenablement le dessin à la lumière du jour, de manière que les ombres soient du côté où elles se trouveraient réellement, si le dessin était véritablement saillant dans un sens ou dans l'autre.

Le beau *fac-simile* d'une photographie lunaire, que nous devons à l'obligeance de M. Warren de la Rue et qui forme la planche XI de la 4e édition du Ciel, prête très-aisément à l'expérience dont nous parlons. Les cratères volcaniques des montagnes lunaires y paraissent tantôt des troncs de cône creux, comme ils sont en réalité, tantôt au contraire ils semblent des ampoules renflées et inverses.

CHAPITRE VI

LA PHOTOGRAPHIE

---

§ I — Premiers essais de fixation des images de la chambre obscure — Découvertes de Niepce et de Daguerre

Quand on reçoit sur un écran blanc, placé au foyer de la lentille convergente de la *chambre noire*, les rayons lumineux émanés des objets extérieurs, il se forme, nous l'avons vu, une image merveilleusement fidèle de ces objets : c'est un véritable tableau en miniature du paysage en vue, avec toutes ses nuances de coloration et de lumière et tous ses détails les plus minutieux; mais c'est une image fugitive, toute idéale pour ainsi dire, ou plutôt dont la réalité ne consiste que dans le mouvement actuel des ondes lumineuses, et dans les lois de leur propagation à travers les divers milieux qui séparent notre rétine des objets eux-mêmes. Qu'on vienne à fermer l'ouverture qui donne accès à ces ondes, et, à l'instant, l'image s'évanouit.

Plus d'un observateur, depuis Porta, l'inventeur de la chambre noire, jusqu'à Niepce et Daguerre, les inventeurs de la photographie, a dû concevoir le désir de retenir sur l'écran et d'y fixer ces images si exactes, et de prendre ainsi pour

collaborateur, dans l'art de la peinture ou du dessin, la nature même. Que fallait-il pour arriver à un tel résultat? Connaître une autre propriété de la lumière, celle que possèdent en effet les rayons lumineux d'impressionner chimiquement certaines substances, de laisser à leur surface une trace visible de leur action, laquelle est généralement d'autant plus vive, que l'intensité des rayons est elle-même plus considérable. Dès 1770, il est vrai, Scheele avait découvert la propriété du chlorure d'argent de noircir sous l'influence de la lumière, ou plutôt avait étudié à nouveau cette propriété connue des anciens alchimistes. C'est sans doute en l'utilisant qu'un habile physicien français des premières années de ce siècle, Charles, réussit à dessiner et montrait dans ses cours des silhouettes obtenues par l'action lumineuse. Comment les produisait-il? On l'ignore; mais le procédé qu'il employait avait sans doute quelque analogie avec celui que décrit Arago en ces termes, et qui permet d'obtenir des épreuves négatives d'une gravure :

« Placez une gravure sur du papier enduit de chlorure d'argent et exposez le tout à la lumière solaire, la gravure en dessus. Les tailles remplies de noir arrêteront les rayons; les parties correspondantes de l'enduit, celles que ces tailles touchent et recouvrent, conserveront leur blancheur primitive. Là, au contraire, où l'eau-forte, le burin, n'ont pas agi, là où le papier a conservé sa demi-diaphanéité, la lumière solaire passera et ira noircir la couche saline. Le résultat nécessaire de l'opération sera donc une image semblable à la gravure par la forme, mais inverse quant aux teintes : le blanc s'y trouvera reproduit en noir, et réciproquement. » Malheureusement ces images négatives, comme les silhouettes de Charles, n'auraient pu se conserver au jour, parce que la lumière, continuant d'agir sur les parties non attaquées d'abord, aurait fini par recouvrir la feuille enduite de chlorure d'une teinte noire uniforme.

Wedgwood, en 1802, parvint à reproduire, sur des peaux ou des papiers enduits de chlorure ou d'azotate d'argent, les peintures des vitraux d'église et aussi à copier des gravures; mais

il ne crut pas possible d'appliquer son procédé à la reproduction des images de la chambre obscure. A la même époque, H. Davy parvint à obtenir des images de très-petits objets en plaçant ceux-ci à une courte distance de la lentille du microscope solaire.

Ces tentatives étaient d'ailleurs incomplètes, en ce sens que ni Wedgwood ni Davy ne trouvèrent le moyen de fixer les images obtenues, de les empêcher de disparaître à la lumière du jour. Environ douze ans plus tard, un de nos compatriotes, Nicéphore Niepce (de Châlon-sur-Saône), qui consacrait ses loisirs à des études scientifiques, aborda ce problème de la reproduction photogénique des images de la chambre obscure. Mais, après un grand nombre d'essais infructueux, il fut obligé de renoncer à obtenir des vues naturelles, monuments ou paysages, à cause du temps fort long que mettaient à recevoir l'action lumineuse les substances dont il faisait usage. Jusqu'en 1829, époque de son association avec Daguerre, Niepce se borna à la *copie photographique des gravures;* mais, en revanche, il réussit complétement à fixer les images, problème que ni Charles, ni Wedgwood, ni H. Davy, n'avaient su résoudre. Voici, en quelques lignes, en quoi consistait son procédé.

Sur une feuille de cuivre plaquée d'argent et parfaitement polie, il appliquait, à l'aide d'un tampon, un vernis composé de bitume sec de Judée dissous dans de l'huile de lavande. La plaque, chauffée doucement, se trouvait alors recouverte d'une couche uniforme et blanchâtre de bitume adhérente à sa surface. Placée en cet état au foyer de la chambre noire, elle laissait, au bout de quelque temps, apparaître de faibles linéaments de l'image. Pour rendre ces traits plus sensibles, Niepce eut l'idée de plonger la plaque dans un mélange d'huile de lavande et de pétrole. Et en effet il reconnut ainsi « que les régions de l'enduit *qui avaient été exposées à la lumière* restaient presque intactes, tandis que les autres se dissolvaient rapidement et laissaient ensuite le métal à nu. Après avoir lavé la plaque avec

de l'eau, on avait donc l'image formée dans la chambre noire, les clairs correspondant aux clairs et les ombres aux ombres (en un mot, une *image positive* de la gravure). Les clairs étaient formés par la lumière diffuse provenant de la matière blanchâtre et non polie du bitume; les ombres par les parties polies et dénudées du miroir, à la condition, bien entendu, que ces parties *se miraient* dans des objets sombres; à condition qu'on les plaçait dans une telle position, qu'elles ne pussent pas envoyer *spéculairement* vers l'œil quelque lumière un peu vive. Les demi-teintes, quand elles existaient, pouvaient résulter de la partie du vernis qu'une pénétration partielle du dissolvant avait rendue moins mate que les régions restées intactes. » (Arago.)

Daguerre commença par perfectionner la méthode de Niepce : il parvint à réduire le temps de l'exposition de la plaque aux rayons lumineux; mais ce temps était encore de plusieurs heures. On comprend donc pourquoi, même avec ces perfectionnements, il était à peu près impossible d'obtenir des épreuves satisfaisantes des images de la chambre obscure : pendant que les objets éclairés par le soleil portaient leurs ombres d'un côté au début de l'expérience, l'astre, entraîné par le mouvement diurne, se déplaçait, et avec lui les ombres portées qui, de la gauche, passaient à la droite. Il en résultait une confusion dans les images, dont la teinte devenait plate et uniforme et dont le relief finissait ainsi par disparaître.

Quoi qu'il en soit, l'idée première et la gloire de l'invention de la photographie reviennent de droit, pour une bonne part, à Niepce, qui n'eut pas le bonheur de jouir lui-même de son triomphe, et de partager avec son associé Daguerre l'honneur de la reconnaissance nationale décernée en toute justice aux deux inventeurs[1]. Mais c'est Daguerre qui a, par l'invention

1. Une loi fut votée, en juillet 1839, pour accorder à Daguerre et à Niepce fils deux pensions viagères de 6000 et de 4000 francs, en échange de l'abandon fait par eux au public des procédés de photographie dont ils étaient inventeur ou héritier. Niepce père était mort en 1833.

d'une méthode originale, porté à sa perfection l'art nouveau de la reproduction, par la lumière, de tous les détails d'une vue naturelle, d'un site de paysage, d'un portrait, d'une scène quelconque. Bien des progrès ont été apportés depuis à cette méthode, qui n'est plus elle-même pratiquée, et à laquelle on a substitué mille procédés plus expéditifs ou moins coûteux; mais, dès le début, les épreuves daguerriennes ont atteint un fini, une précision qui, depuis, n'ont pas été dépassés. D'ailleurs, au point de vue historique, scientifique et comme application des lois des phénomènes physiques, le procédé de Daguerre a une importance qui ne nous permet pas d'en omettre la description détaillée. L'enthousiasme avec lequel il a été accueilli à son origine par les savants, par le public, comme par les artistes, n'a rien que de légitime, si l'on songe aux immenses services qu'il a rendus lui-même et que les procédés nouveaux ont de plus en plus multipliés : la géographie, toutes les sciences physiques et naturelles, l'ethnographie, l'architecture, et même les arts de la peinture et du dessin, ont eu part à ces services, qui ne font que s'étendre tous les jours.

Voyons donc quel était à l'origine, c'est-à-dire en 1839, le procédé de Daguerre, et comment il était parvenu à reproduire les images de la chambre noire à l'aide de l'appareil qu'on nommait alors le *daguerréotype*.

§ II — Daguerréotypie ou Photographie daguerrienne

Comme Niepce, Daguerre employait une feuille de cuivre plaquée d'argent, de l'épaisseur d'une forte carte. Il divisait lui-même en cinq opérations la série des manipulations qui constituaient son procédé, et dont voici la description d'après la notice publiée par l'inventeur.

La première opération consistait dans le polissage et le nettoyage de la plaque. Avec du coton imbibé d'huile d'olive

et de la ponce pulvérisée très-fine, la surface de l'argent était d'abord polie avec beaucoup de soin; on enlevait alors la couche grasse avec un tampon mouillé d'eau étendue d'acide nitrique. La plaque, chauffée fortement, était de nouveau polie à la ponce, mais à sec, jusqu'à ce que l'argent fût parfaitement bruni.

En cet état, la plaque pouvait recevoir la couche sensible, seconde opération qui consistait à exposer la surface polie aux vapeurs qui se dégageaient spontanément de quelques fragments d'iode. Ceci se faisait dans l'obscurité, et ce n'est qu'à la clarté d'une bougie que l'opérateur jugeait si le résultat convenable était obtenu; la couche d'argent devait avoir pris alors une belle couleur de jaune d'or. Selon la température, il fallait une exposition de cinq minutes à une demi-heure.

On mettait alors la plaque ainsi préparée au foyer de la chambre obscure, en ayant soin de ne pas laisser plus d'une heure d'intervalle entre cette troisième opération et la précédente. Les objets dont on voulait reproduire l'image devaient être éclairés par la lumière directe du soleil. Après une exposition dont la durée variait avec l'heure du jour, avec la saison, et qui, pour Paris, était de 3 minutes au moins, de 30 minutes au maximum, l'action photogénique de la lumière était complète. La plaque, sur laquelle rien n'était encore visible et qu'il fallait soustraire à toute lumière, portait l'empreinte fidèle de tous les objets qui avaient concouru à lui envoyer des rayons lumineux.

Il restait à faire apparaître cette image cachée sous son voile, et à la fixer de manière à la mettre à l'abri de toute destruction ultérieure. Voici comment Daguerre procédait pour ces deux dernières opérations.

La plaque était portée à l'intérieur d'une boîte, et la face impressionnée, inclinée à 45°, était soumise à l'action des vapeurs qui s'échappaient d'une capsule pleine de mercure chauffée à une température de 60° à 75° centigrades. Au bout de quelques minutes, l'image commençait à paraître et se

dessinait de plus en plus nette et précise, ce dont on s'assurait en s'éclairant de la lumière d'une bougie. Quand la température du mercure s'était spontanément abaissée à 45° environ, l'opération était finie et l'épreuve arrivée à sa perfection. On pouvait alors la conserver sans altération pendant plusieurs mois, à une condition, toutefois, celle d'éviter de la regarder souvent et au grand jour.

« Le but de la cinquième opération, dit Daguerre, est d'enlever de la plaque l'iode, qui, autrement, lorsque l'épreuve serait exposée trop longtemps à la lumière, continuerait à se décomposer et la détruirait. » Cette interprétation était-elle scientifiquement bien exacte? Nous le verrons plus loin. Toujours est-il que l'inventeur parvenait à son but en agitant la plaque dans une solution chauffée de sel marin, ou mieux dans une solution d'hyposulfite de soude, puis en la lavant à l'eau très-chaude. On reconnaît que cette dernière opération a réussi quand toute trace de la primitive couche jaune d'or a disparu. En mettant ensuite l'épreuve sous verre pour soustraire la surface de l'image à tout frottement elle se conservait intacte, même exposée au grand jour.

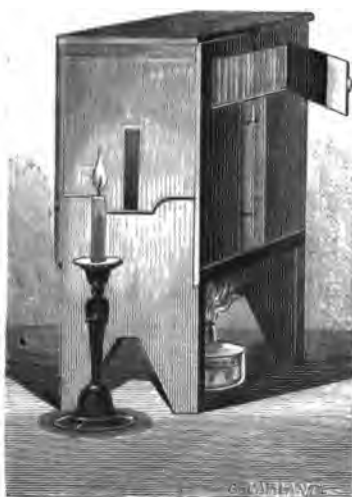


FIG. 205. — Boîte à mercure, pour la révélation des images daguerriennes.

Telle était, en résumé, et sauf des détails de manipulation qui n'ont pas d'intérêt au point de vue scientifique, la méthode inventée par Daguerre. Elle reçut bientôt quelques perfectionnements dont nous allons dire un mot; après quoi nous donnerons la description des procédés de photographie, qui n'ont pas tardé à détrôner l'invention première, sans rien ôter, du reste, au mérite des deux hommes qui ont contribué à la découvrir.

§ II. — Perfectionnements apportés au procédé de Daguerre

Nous avons dit que la découverte de Niepce et de Daguerre avait été accueillie partout avec un grand enthousiasme. Comme les manipulations qu'exigeait la pratique n'étaient ni trop difficiles, ni trop coûteuses, et que l'invention d'ailleurs était tombée, grâce à la loi, dans le domaine public, un grand nombre d'amateurs, industriels, artistes ou savants, se mirent à faire de la photographie. Il en résulta une série de perfectionnements ou de modifications à la méthode primitive. Nous mentionnerons seulement les plus importants de ces progrès.

Dès le début, on s'attacha à rendre l'image le plus possible durable en la protégeant contre l'action ultérieure de la lumière ou contre le frottement. M. Dumas proposa de recouvrir la plaque d'un vernis en versant à sa surface une dissolution bouillante d'*une* partie de dextrine dans *cinq* parties d'eau. Le fixage de M. Fizeau au chlorure d'or mérite aussi d'être mentionné. Après avoir lavé avec un grand soin, dans l'hyposulfite de soude, la plaque impressionnée, M. Fizeau versait sur toute sa surface une solution mixte de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude, puis il chauffait l'épreuve par-dessous avec une forte lampe : peu à peu on voyait l'image s'éclaircir, et, au bout d'une minute ou deux, prendre une grande vigueur. La mince couche d'or qui recouvre en ce moment toute l'épreuve, en renforçant les tons, protége l'image contre les altérations accidentelles.

Le procédé de Daguerre demandait encore, comme nous venons de le voir, une exposition assez longue, en moyenne un quart d'heure, aux rayons solaires. On s'est attaché, avec une grande raison, à réduire cette durée qui, à divers égards, restreignait l'emploi du daguerréotype. Pour les portraits des personnes vivantes, des animaux, pour la reproduction des objets mobiles, il importait extrêmement de résoudre ce pro-

blème, qui revenait à chercher des substances plus rapidement impressionnables que l'iodure d'argent. On en trouva un grand nombre, qui reçurent le nom de *substances accélératrices*, parce qu'elles venaient ajouter leur influence à celle de l'iode.

Dès 1841, M. Claudet reconnut que la plaque iodée, exposée aux vapeurs de brome, gagnait considérablement en sensibilité. Après avoir pris une teinte rose sous l'influence de ces vapeurs, la plaque était de nouveau exposée à la vapeur d'iode, jusqu'à ce que sa surface eût pris une teinte violette. Parmi les substances accélératrices employées depuis, citons le chlorure d'iode, diverses préparations de bromure d'iode, de chlorobromure d'iode et plusieurs solutions connues sous les noms de *liqueur hongroise*, *liqueur allemande*, les unes employées sans le secours de l'iode, les autres n'agissant qu'après ce dernier corps sur la surface de la plaque d'argent.

Grâce à cet accroissement dans la sensibilité des substances impressionnables, les procédés de l'*héliographie* (c'est le nom que Niepce donna dès l'origine à sa méthode) furent beaucoup plus expéditifs. On put prendre des vues, faire des portraits en quelques secondes et même se passer des rayons directs du soleil : la lumière diffuse suffit pour obtenir des épreuves, moins vigoureuses il est vrai, mais par cela même plus harmonieuses, plus artistiques. Les perfectionnements apportés à la chambre noire, à l'appareil optique, que nous allons bientôt décrire, ont contribué aussi à ces progrès.

Avant de passer à la description des procédés photographiques qui se sont peu à peu substitués à ceux des premiers inventeurs, revenons sur l'interprétation scientifique, physico-chimique des phénomènes que nous venons d'étudier. Nous n'avons rien à dire du côté purement optique des phénomènes; la formation des images au foyer de la chambre obscure a été complétement expliquée dans les chapitres consacrés, soit aux phénomènes lumineux et à leurs lois, soit aux instruments d'optique proprement dits. Mais que se passe-t-il à la surface de la plaque? comment se forment les images? Quel est le

mode d'action de la lumière, et comment les images, une fois formées, mais encore invisibles, deviennent-elles visibles dans tous leurs détails?

On a déjà vu que l'exposition de la plaque argentée aux vapeurs spontanées de l'iode donne lieu à la formation d'un composé chimique, l'*iodure d'argent*. C'est ce composé qui recouvre la surface primitivement blanche du métal d'une teinte qui varie suivant l'épaisseur, depuis le jaune-paille, le jaune d'or ou orange, jusqu'au rouge, au bleu, au violet. Disons d'abord que ce phénomène de coloration n'est pas dû à la couleur de l'iodure d'argent, qui est blanc, mais qu'il s'agit d'un phénomène où l'interférence des rayons lumineux joue le principal rôle, comme nous l'avons vu dans le chapitre des *Phénomènes de la physique* consacré aux couleurs des lames minces. M. Dumas a évalué le poids de la couche d'iodure formée à la surface d'une plaque daguerrienne, et il en a conclu l'épaisseur approchée de la couche elle-même. Cette détermination est assez curieuse pour que nous la rapportions d'après le célèbre chimiste lui-même.

« Une plaque de 5760 millimètres carrés de surface, ayant été amenée à la nuance jaune-paille par son exposition à la vapeur d'iode, fut rapportée sur une balance très-délicate, où l'on avait fait exactement la tare : il y avait une augmentation de poids certaine, évidente, mais elle ne s'élevait pas à un demi-milligramme. Quand la nuance fut du jaune d'or, l'augmentation du poids arriva au demi-milligramme. En prolongeant la durée de l'action de la vapeur d'iode par delà le temps nécessaire, en quadruplant cette durée, par exemple, j'obtins des effets très-appréciables à la balance : une augmentation de poids de 2 milligrammes. Je supposai que le quart de cette quantité aurait suffi pour former à la totalité de la surface la dose d'iodure nécessaire à la production de l'image. Mais en calculant le poids d'iodure d'argent que cet iode représente, en calculant le volume d'iodure qui correspond à ce poids, on arrive à se rendre compte de l'épaisseur de la couche d'iodure

d'argent déposée à la surface de la plaque. Elle n'est pas égale à UN MILLIONIÈME DE MILLIMÈTRE. »

Une fois la plaque métallique recouverte d'iodure d'argent, et aussi de bromure d'argent, quand elle a été soumise à l'action des substances accélératrices, que se passe-t-il quand elle est impressionnée par la lumière? Quelle influence les ondes lumineuses ont-elles sur la couche sensible? Sur ce point, les opinions sont partagées. D'après l'opinion de M. Dumas, opinion émise à l'époque où la découverte de Daguerre fut rendue publique, l'action de la lumière serait purement mécanique : elle aurait pour effet de soulever ou de fendiller la couche de l'iodure d'argent, en permettant ainsi au mercure d'arriver au contact de l'argent métallique, tandis que l'iodure non fendillé resterait imperméable. En examinant au microscope la couche mercurielle déposée après la troisième opération, le célèbre chimiste reconnut que cette couche est composée de granules de mercure très-irréguliers (d'un diamètre égal à environ la 800e partie d'un millimètre). Les parties blanches ou lumineuses sont recouvertes de ces granules; les ombres n'en présentent presque pas; les demi-teintes en sont moins garnies que les blancs; en un mot, les granules de mercure sont déposés en quantité proportionnelle aux érosions de l'iodure d'argent.

D'autres savants croient que les choses se passent d'une autre façon. Selon eux, l'iodure d'argent, sous l'action des ondes lumineuses, est en partie décomposé; il se transforme en sous-iodure qui, en contact avec le protoiodure de mercure, donne naissance à de l'iodure rouge et à du mercure métallique. D'après cette théorie, qui a été exposée dès 1843 par MM. Choiselat et Ratel, « les blancs sont produits par une poussière d'une grande ténuité d'amalgame d'argent simplement déposé sur la plaque; ces blancs sont d'un ton d'autant plus vif, que cette poussière est plus abondante et plus riche en argent; quant aux noirs, ils sont le résultat du dépôt d'un argent extrêmement divisé, mêlé mécaniquement à une très-faible quantité de mercure provenant du lavage. »

Quelle que soit, du reste, la théorie vraie, que les granules soient formés d'amalgame ou de mercure métallique, leur dépôt à la surface de la plaque forme un assemblage évidemment instable, et la nécessité de les protéger contre les altérations extérieures est la même dans les deux cas. De là l'importance de l'opération du fixage, qui, pour les épreuves daguerriennes, s'obtenait, nous l'avons vu, par le dépôt d'une mince couche transparente d'un sel d'or.

CHAPITRE VII

PHOTOGRAPHIE SUR PAPIER ET SUR VERRE

---

§ I — Photographie sur papier — Invention de Talbot — Procédés Blancquard-Évrard

De même que les noms de Niepce et Daguerre sont attachés à l'invention première de la photographie sur plaque métallique, ceux de Talbot et de Blancquard-Évrard caractérisent la découverte de la photographie sur papier : à Niepce et à Talbot la gloire d'avoir conçu l'idée ; à Daguerre et à Blancquard-Évrard, celle d'avoir réalisé pratiquement et perfectionné le procédé du premier inventeur.

Moins de deux années s'étaient écoulées depuis que François Arago et Gay-Lussac avaient fait leurs rapports à la chambre des députés et à la chambre des pairs sur l'invention du daguerréotype, quand une lettre d'un savant anglais, Talbot, lue à l'Académie des sciences par Biot, fit connaître les procédés qu'il avait trouvés pour reproduire directement sur un papier sensible les images de la chambre noire. Voici, d'après cette communication, en quoi consistait le procédé de Talbot :

« On lave avec une solution de nitrate d'argent dans l'eau

pure un des côtés d'une feuille de papier qu'on marque pour pouvoir la reconnaître, et on la fait sécher doucement. On la plonge ensuite pendant deux minutes dans une dissolution d'iodure de potassium. On forme, par le mélange d'une dissolution de nitrate d'argent avec une dissolution saturée d'acide gallique, auquel on ajoute un peu d'acide acétique, du *gallonitrate d'argent*, avec lequel on lave le papier ioduré. On plonge le papier ainsi humecté dans l'eau, on le sèche avec le papier brouillard, et l'on a ainsi obtenu le papier *calotype*. On le met au foyer de la chambre obscure : une minute a suffi pour y imprimer l'image invisible encore, mais qui apparaît dans tous ses détails lorsque, après avoir lavé une fois le papier dans le gallonitrate d'argent, on le chauffe doucement devant le feu. Pour fixer le tableau, il faut l'humecter avec une dissolution de bromure de potassium, le laver encore et le sécher. Les dessins ainsi fixés restent transparents, et l'on peut en tirer des copies en se servant d'une deuxième feuille de papier *calotype* qu'on presse contre le tableau, et qu'on expose ainsi à la lumière. »

Dans ce procédé, nous retrouvons les mêmes principes physiques que dans ceux de Niepce et Daguerre. Une feuille est recouverte d'une couche *sensible*, *impressionnable* à la lumière; elle est soumise à cette influence au foyer de la chambre noire. Mais, encore invisible à la sortie de la chambre, l'image a besoin de l'action d'une substance spéciale, d'une opération qui la *révèle;* puis, pour échapper aux causes de destruction ultérieure, il reste une dernière opération, celle du *fixage*.

Tous les procédés ultérieurs de photographie, et ils sont innombrables, sont basés sur les mêmes principes, nécessitent les mêmes opérations fondamentales.

En quoi le procédé de Talbot, qui, au début, fournissait des épreuves défectueuses à bien des égards, marquait-il un progrès dans l'art nouveau? Le voici. Les plaques de Daguerre étaient lourdes et coûteuses, embarrassantes en voyage, d'un maniement peu commode. De plus, l'image, malgré son admirable netteté, le fini de ses détails, offre un miroitement qui

rend l'examen difficile : on ne la voit que dans de certaines conditions d'éclairement. Enfin, l'épreuve est unique : il faut recommencer autant de fois l'opération qu'on veut avoir de copies du même objet. A tous ces points de vue, mais surtout au dernier, celui de la reproduction des copies avec une même épreuve, le procédé de Talbot mettait sur la voie de progrès considérables dans l'art de la photographie, et ces progrès se sont en effet réalisés en quelques années.

D'abord un de nos compatriotes, M. Blancquard-Évrard, de Lille, parvint, en modifiant le procédé Talbot, à obtenir des épreuves sur papier de plus en plus parfaites, et, en même temps qu'il perfectionnait les résultats, il trouvait les moyens de réussir presque à coup sûr, ce qui était loin d'arriver avec le procédé décrit plus haut. Décrivons succinctement sa méthode.

Comme le procédé Talbot, cette méthode comprend deux opérations principales : en premier lieu, on obtient, à l'aide de la chambre noire, une épreuve *négative* de l'image à reproduire, c'est-à-dire une image inverse, les lumières étant figurées par des *noirs*, les ombres par des *clairs*, et toutes les demi-teintes par des mélanges en proportion exacte de ces deux teintes extrêmes ; à l'aide de cette épreuve négative, on tire des épreuves *positives*, où l'image reprend son apparence normale, épreuves qu'on peut d'ailleurs obtenir en nombre indéfini.

L'épreuve négative se fait sur papier sensible, et c'est surtout dans la préparation de ce papier que réside le progrès dû à M. Blancquard-Évrard. Au lieu d'enduire seulement la surface de la couche sensible, il imprégnait toute l'épaisseur d'iodure d'argent ; plaçant la feuille encore humide entre deux glaces, il la disposait ainsi au foyer de la chambre noire. Voici, du reste, comment s'obtenait le papier photogénique. On choisissait du papier collé, mince, uni et bien homogène, qu'on plaçait par une de ses faces sur une solution de nitrate d'argent, en ayant soin que l'autre face ne fût pas mouillée par le liquide, et que le contact se fît complétement sans interposition de bulles d'air. Après quelques minutes, la feuille était étendue sur une glace,

la face humide en dessus, et on l'y laissait sécher dans l'obscurité. Le papier sec était alors immergé dans une solution d'iodure et de bromure de potassium, où, une double décomposition chimique ayant lieu, il se formait à la fois de l'iodure d'argent et du bromure d'argent, les deux substances impressionnables qui pénétraient toute l'épaisseur du papier.

En employant, humide encore, le papier photogénique, on obtient rapidement l'image, ce qui est surtout indispensable pour la reproduction des objets animés, notamment pour les portraits. Le papier sec exige une exposition plus longue à la lumière : on l'emploie, en voyage, pour les vues, les paysages, les monuments.

Retiré de la chambre noire, le papier ne laissait rien voir à sa surface, comme les plaques daguerriennes. Mais ici le *révélateur* est une solution d'acide gallique ou pyrogallique, dans laquelle on plonge la feuille de papier. Cet acide organique réduit les sels d'argent partout où il y a eu impression de la lumière, et les parties ainsi impressionnées se couvrent d'une teinte noire de gallate d'argent d'autant plus prononcée, que l'action de la lumière a été plus vive. L'épreuve est donc négative. Pour la rendre inaltérable à l'action de la lumière, on la lave dans une dissolution d'hyposulfite de soude ou dans un bain de bromure de potassium : les sels d'argent qui n'ont pas été décomposés sont ainsi enlevés, et l'image est fixée.

A l'aide de l'image négative ainsi obtenue, il s'agit maintenant de produire des épreuves positives, ce à quoi on parvient par un procédé analogue à celui qui servait primitivement à Niepce pour copier des gravures. On imbibe de cire l'épreuve négative de manière à rendre le papier translucide ou même transparent. Il suffit alors de poser cette épreuve sur une feuille de papier sensible, et d'exposer les deux feuilles maintenues entre deux glaces, soit à la lumière directe du soleil, soit à la lumière du jour ou diffuse. Sous l'influence de la lumière, la feuille de papier sensible est impressionnée sous les blancs de l'épreuve négative, de sorte qu'une image positive se fait à sa

surface, laquelle est d'abord invisible, mais est ensuite révélée par l'acide gallique, tout comme l'épreuve primitive.

§ II — Photographie sur verre albuminé

La photographie sur papier devint rapidement populaire, et si ses épreuves étaient d'une finesse beaucoup moindre que les plaques daguerriennes, si les détails minutieux des épreuves sur métal disparaissaient à cause du grain et de la texture fibreuse du papier, en revanche les nouvelles images étaient plus appréciées des artistes. Du reste, dans cette seconde phase de l'art photographique, les progrès se multiplièrent avec une étonnante rapidité.

On fit d'abord des épreuves sur papier ciré, gélatiné, dont la surface très-polie permettait la reproduction des détails les plus fins. Mais bientôt une découverte due à un neveu de Niepce, à M. Niepce de Saint-Victor. mit la photographie dans une voie nouvelle qui est encore la plus généralement suivie. Au lieu de prendre, comme Daguerre, une plaque métallique, ou, comme Talbot et Blancquard-Évrard, une feuille de papier pour y faire le dépôt de la couche sensible, c'est sur une plaque de verre, sur une feuille de glace bien polie que M. Niepce de Saint-Victor réussit à déposer la substance impressionnable et à produire une épreuve négative. La transparence du verre, son inaltérabilité, le poli de sa surface, son bon marché, tous ces motifs ont peu à peu conduit les photographes à le substituer aux plaques métalliques de Daguerre et au papier sensibilisé. Avant d'arriver au procédé le plus généralement suivi aujourd'hui, qui est la photographie sur collodion, décrivons donc encore très-rapidement le procédé de M. Niepce de Saint-Victor.

La couche sensible dont il recouvrait la plaque de verre était formée d'un liquide composé lui-même de la façon suivante :

albumine obtenue en battant des blancs d'œufs jusqu'à la réduction en neige; iodure de potassium, 1 pour 100; eau, 25 pour 100. La glace, recouverte d'une couche bien régulière, est mise à sécher dans l'obscurité, ce qui demande à peu près un jour. On l'immerge alors dans une solution d'acéto-nitrate d'argent, et l'on a une plaque prête à recevoir l'action de la lumière. Une exposition de quinze à trente secondes au foyer de la chambre noire suffit.

L'épreuve négative obtenue, on tire des épreuves positives comme nous l'avons dit plus haut. Ces épreuves, étant tirées sur papier, l'inconvénient du grain s'y retrouve, mais avec cette différence considérable que l'épreuve positive y étant elle-même soustraite, la finesse des contours, des traits, des nuances y est parfaite, et que cette finesse n'est altérée qu'une fois au lieu de deux.

Du reste, rien n'empêche d'éviter même cet inconvénient en tirant des épreuves positives sur verre albuminé. C'est ce qu'on fait surtout pour celles qui sont destinées au stéréoscope, la transparence étant une condition pour l'examen stéréoscopique par la lumière transmise.

§ III — Photographie sur collodion

Schœnbein découvrit, en 1846, un produit qui attira grandement l'attention des savants et du public. On crut un instant, en effet, que cette substance, connue sous les noms de *fulmi-coton*, *coton-poudre* ou *pyroxyline*, détrônerait la poudre ordinaire. La pyroxyline se prépare d'une façon très-simple, en trempant pendant une demi-minute du coton cardé dans l'acide azotique monohydraté, en lavant à grande eau et en séchant à l'air. Elle se dissout dans un mélange d'alcool et d'éther.

C'est à cette dissolution, qui est employée en chirurgie et en

médecine, qu'on donne le nom de *collodion*. Un photographe anglais, M. Archer, eut l'idée, en 1851, de substituer le collodion à l'albumine dans la préparation des plaques de verre qui servent à obtenir les épreuves négatives. Le rôle que jouent l'albumine et le collodion est le même, mais les épreuves faites par le dernier procédé exigent un temps de pose encore moins long, et l'on obtient des effets pour ainsi dire instantanés. De là la possibilité de reproduire des vues qui renferment des êtres animés, des personnages, de saisir l'expression rapide de la physionomie dans les portraits, de représenter des corps en mouvement : les nuages entraînés par le vent, les vagues d'une mer agitée, les animaux, etc., etc.

Les procédés de photographie au collodion ont été variés de cent manières ; en indiquant ce qu'il y a d'essentiel dans l'un d'eux, nous ferons comprendre tous les autres. Mais il faut dire qu'ici, comme dans le daguerréotype, comme dans la photographie sur papier, sur verre albuminé, nous laissons de côté le détail des manipulations, détail qui a son importance, car il est le plus souvent une condition indispensable de la réussite. Comme notre intention n'est pas de faire ici un manuel, même abrégé, de photographie, mais de faire comprendre les principes physiques de cet art aujourd'hui si répandu, le lecteur appréciera les motifs de notre réserve.

Voici une formule de collodion normal, c'est-à-dire tel qu'on le prépare avant le mélange des substances qui doivent contribuer à la production de la couche sensible :

Éther sulfurique rectifié	600
Pyroxyle	12
Alcool à 40°	300

La liqueur iodurée est une solution alcoolique d'iodures de potassium, de cadmium, d'ammonium et des bromures des mêmes métaux. On y ajoute un fragment, une paillette d'iode. Le liquide formé du mélange de ces deux solutions s'étend, comme on fait pour l'albumine, sur la glace bien nettoyée. Un

peu avant que la couche soit sèche, on plonge la glace très-rapidement dans un bain de nitrate d'argent. La formation d'iodure, de bromure d'argent qui en résulte produit une couche d'apparence blanchâtre et opaque : c'est la couche photogénique. Cette opération se fait toujours dans l'obscurité.

La glace est alors placée dans le châssis de la chambre noire, et l'on peut opérer, c'est-à-dire exposer à l'action de la lumière. En quelques secondes, l'impression est produite, et il n'y a plus qu'à soumettre l'épreuve aux opérations du développement et de la fixation de l'image, ce qui se fait au moyen de l'acide pyrogallique, puis du lavage à l'hyposulfite de soude.

En albuminant préalablement la plaque, avant de la recouvrir de la couche au collodion, on peut opérer plusieurs jours après la préparation. C'est le procédé Taupenot au collodion sec.

L'épreuve négative obtenue, on procède, comme nous l'avons dit, pour la production d'épreuves positives.

§ IV — L'Appareil optique du photographe

Maintenant que nous avons donné une idée des principales méthodes de photographie qui se sont succédé depuis l'invention de Niepce et de Daguerre, il est bon de revenir sur un point qui leur est commun à toutes, et d'entrer dans quelques détails sur l'appareil optique, c'est-à-dire sur la disposition de la chambre noire avec ses accessoires les plus essentiels.

La chambre noire se compose d'une boîte rectangulaire de bois, reposant sur une planchette à coulisse, et formée elle-même de deux ou plusieurs compartiments ou tiroirs qui, en glissant entre les coulisses, permettent d'allonger ou de diminuer à volonté, dans le sens horizontal, l'une des dimensions de la boîte. Au lieu de boîtes à compartiments multiples, on emploie beaucoup des chambres noires dont les parois sont rendues mobiles par leur forme en soufflet.

En avant, elle porte une ouverture à laquelle on fixe l'objectif, c'est-à-dire le tube AB où se trouvent enchâssés les verres ou lentilles destinées à produire une image réelle des objets.

La face postérieure de la chambre noire est disposée de façon à recevoir dans une rainure le châssis qui porte la feuille ou la plaque G sur laquelle la lumière doit dessiner l'image. Mais, avant de donner accès à la lumière sur la feuille sensible, il faut pouvoir s'assurer que l'image est bien au foyer, ce que l'opérateur vérifie en plaçant d'abord dans le châssis une glace dépolie, à la surface de laquelle l'image se forme et peut être vue par transparence. Si cette image manque de netteté, c'est que la glace n'est pas bien au foyer; et alors on corrige ce défaut en faisant mouvoir les tiroirs de la chambre dans un sens ou dans



FIG. 206. — Chambre noire des photographes.

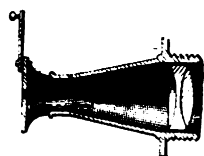


FIG. 207. — Appareil photographique de campagne, à soufflet.

l'autre, suivant qu'il faut raccourcir ou allonger la distance pour trouver le foyer exact : c'est ce qu'on nomme *mettre au point*, opération en tout semblable à celle que nous avons indiquée pour la mise au point des oculaires des instruments d'optique, télescopes ou microscopes.

La netteté de l'image dépend de la bonté de l'objectif, qui doit être achromatique et dépourvu d'aberration de sphéricité.

Les figures 208 et 209 donnent en coupe la disposition de plusieurs objectifs, les uns simples, les autres à verres combinés. L'objectif simple exige un diaphragme à très-petite ouverture, afin d'éviter l'aberration de sphéricité, laquelle changerait, sur l'image, les lignes droites de la nature en lignes plus ou moins courbées. La quantité de lumière qui passe par une ouverture étroite étant faible, cet objectif nécessite un temps de pose plus



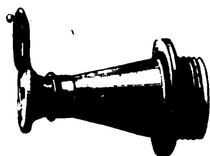


Fig. 208. — Objectif simple.

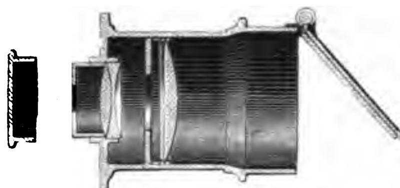




Fig. 209. — Objectif composé, avec glace redressante.

considérable. On s'en sert plus spécialement pour les vues, les paysages, les monuments, les reproductions d'objets inanimés, de natures mortes, comme on dit en style d'art.

L'objectif à verres combinés (fig. 209), dont le diaphragme est placé en arrière des systèmes de lentilles, permet l'introduction d'une plus grande somme de lumière; il est employé de préférence pour les portraits, parce qu'il n'exige pas une pose aussi longue.

Dans le daguerréotype, l'image se faisant telle quelle, mais renversée sur la plaque même, en la renversant de haut en bas pour la voir droite, elle était symétrique de l'objet, c'est-à-dire que la droite s'y voyait à gauche, et réciproquement. Pour obtenir une image droite, on adaptait à l'objectif, soit une

glace inclinée à 45°, soit un prisme où la réflexion totale se faisait sur la face hypoténuse. La photographie sur verre n'exige point cette précaution, puisque c'est l'épreuve négative qui se trouve renversée et symétrique, et qu'en la retournant pour obtenir l'épreuve positive, celle-ci se trouve avoir la position normale.

Dans les premières années qui suivirent la découverte de Daguerre, les opérateurs les plus habiles, malgré le soin qu'ils apportaient aux diverses manipulations qui constituaient le procédé, échouaient souvent et n'obtenaient que rarement des épreuves possédant la netteté de l'image qu'ils venaient d'observer sur la glace dépolie. On crut d'abord que cela tenait à la difficulté de faire coïncider rigoureusement le plan de la plaque avec le plan dépoli du verre. Un photographe, M. Claudet, chercha à remédier à ce dernier inconvénient et y parvint. Or le résultat fut contraire à son attente. Les épreuves obtenues furent constamment confuses, mal définies. Après de nouvelles recherches, il découvrit la cause de cet insuccès : c'est que le foyer lumineux, ou visuel, ne coïncide pas, en effet, avec le foyer des rayons chimiques, avec le foyer photogénique. Et ce défaut de coïncidence dépend à la fois, et de la nature des objectifs, et de la distance des objets, et enfin de l'intensité de la lumière.

Le problème a été résolu pratiquement depuis par les opticiens, qui construisent des objectifs pour lesquels le foyer photogénique coïncide avec le foyer visuel. Quand l'objectif d'un appareil ne jouit pas de cette propriété, il importe que le photographe l'étudie avec soin, et, par des essais multipliés, arrive à reconnaître la position pour laquelle l'image sur le verre dépoli se trouvera coïncider avec le foyer chimique, de manière à produire sur la glace sensibilisée l'image la plus nette possible.

Nous avons dit à peu près tout ce qu'il y a d'essentiel, au point de vue scientifique, dans cette intéressante application aux arts du dessin de la physique et de la chimie. Néanmoins

il nous reste à mentionner une série de découvertes faites récemment dans le domaine de la photographie, et qui ont leur intérêt pour les physiciens et les hommes de l'art, pour les savants et les artistes. Nous joindrons à cette description succincte quelques détails sur les applications de la photographie elle-même aux sciences et aux arts.

§ V — Photographie a la lumière artificielle

Comme on vient de le voir, l'héliographie est fondée sur la propriété des rayons lumineux de modifier chimiquement les substances dites impressionnables ou sensibles; ce sont les radiations dites chimiques émanées de la lumière solaire directe ou de la lumière du jour, c'est-à-dire de la lumière solaire diffuse, qui jouissent des propriétés photogéniques. Mais d'autres lumières plus ou moins intenses ne peuvent-elles remplacer, au besoin, celle du soleil? C'est une question que n'ont pas tardé de se poser et de résoudre les physiciens et les photographes.

La lumière électrique, par sa puissante intensité, devait la première attirer l'attention. On connaissait depuis longtemps son action colorante sur le chlorure d'argent, mise en évidence par Brande peu après la découverte de l'arc voltaïque par Davy. M. de la Rive constata plus tard qu'elle agissait sur les plaques daguerriennes, et ce savant obtint l'image d'un buste de plâtre éclairé par la lumière éblouissante de l'électricité. L'application de cette source lumineuse à la photographie est entrée dans le domaine de la pratique, ainsi qu'il résulte de la note suivante que nous empruntons au journal *les Mondes*, d'octobre 1866 :

« M. Woodbury, de Manchester, continue à faire usage, pour la production de ses clichés photographiques sur gélatine, de la lumière électrique produite par la machine de M. Wild.

Cette lumière, excitée entre les pointes de deux charbons, est entourée des négatifs qu'elle doit traverser pour impressionner la gélatine, et l'on peut constater chaque jour que les reliefs sur gélatine obtenus avec la lumière électrique sont mieux définis que lorsqu'on opère à la lumière du soleil ou du jour. » Cette note est relative, comme on voit, à un procédé de gravure héliographique, nous en dirons plus loin quelques mots; mais la suite est relative à la production de véritables clichés photographiques : « MM. Saxon et C[ie], aussi de Manchester, ne font plus leurs agrandissements qu'à la lumière électrique de M. Wild. En possession d'une lumière artificielle qui brille jour et nuit, ils ont pu prendre l'engagement d'agrandir en vingt-quatre heures les clichés négatifs qu'on leur confie. »

Toutefois l'emploi de cette lumière est coûteux. Dans les cas, assez rares d'ailleurs, où l'on peut avoir besoin de faire de la *photographie de nuit*, on préfère de beaucoup la lumière produite par la combustion du magnésium à celle de l'électricité. L'invention des lampes au magnésium par sir David Brewster, le perfectionnement qu'un de nos savants compatriotes, M. Le Roux, y a apporté en associant le zinc au magnésium, ont permis d'appliquer cette lumière artificielle à la photographie. On a commencé par photographier des gravures, des bustes et des statues, et l'on a reconnu ainsi la valeur photogénique de la lumière du magnésium, d'ailleurs moins coûteuse que la lumière électrique.

On est arrivé par ce moyen à reproduire avantageusement les objets inanimés; mais, au point de vue artistique, l'effet est peu satisfaisant à cause de l'opposition nécessairement exagérée des lumières et des ombres : les portraits photographiques au magnésium ont une apparence pour ainsi dire cadavérique. En revanche, on a obtenu des images d'objets qui eussent échappé à l'art du photographe, par exemple l'intérieur d'une des pyramides d'Égypte, celui des célèbres cavernes du Kentucky connues sous le nom de *Mammoth-caves* (cavernes de Mammouth) : les magnifiques stalactites de ces roches souterraines ont pu

ainsi être reproduites avec la plus grande fidélité. Les souterrains curieux, comme les catacombes de Rome, celles de Paris, ont pu bénéficier aussi de ce mode d'éclairage et de ses propriétés photogéniques.

D'autres lumières artificielles ont été essayées pour la production des images photographiques et ont réussi dans des mesures diverses. Telles sont les lumières produites par la combustion d'un jet de gaz oxyhydrogène projeté au chalumeau sur des fragments solides de matières réfractaires : chaux, magnésie, zircone, chrome, etc. M. Van Monckoven a obtenu des épreuves agrandies sur collodion ou sur papier en un temps variant de une à trois minutes, en éclairant à l'aide de la lumière du chalumeau à gaz projetée sur un mélange d'acide titanique, de magnésie et de carbonate de magnésie. Ce n'est pas tant d'ailleurs l'intensité lumineuse de la source qui est favorable à la reproduction, que la quantité des rayons chimiques émis par elle.

§ VI — Épreuves amplifiées — Photographie microscopique

On comprend qu'en projetant à l'aide d'un microscope solaire l'image d'une épreuve photographique sur un écran sensibilisé, l'image agrandie de tous les détails de l'épreuve primitive viendra se former sur l'écran. Si l'on a opéré à l'aide d'un négatif, on obtiendra une épreuve positive ; mais on peut aussi obtenir un cliché négatif amplifié lui-même, et, de là, tirer autant d'épreuves positives qu'on voudra par la méthode ordinaire. Ce dernier procédé est beaucoup plus expéditif. Voici en quoi il consiste.

On tire d'abord, avec le cliché négatif obtenu à la chambre noire, un cliché positif de mêmes dimensions. C'est ce dernier qu'on soumet à l'amplification du microscope solaire, de sorte que l'épreuve amplifiée se trouve elle-même une épreuve néga-

tive. Il est bien clair que cette épreuve est reçue sur une glace collodionnée qu'on a rendue sensible par les procédés connus. Une fois révélée et fixée, l'épreuve négative agrandie aux dimensions voulues sert au tirage des épreuves positives. De cette façon l'appareil optique d'agrandissement n'est employé qu'une fois, ce qui explique la plus grande rapidité de cette méthode.

La difficulté, dans l'agrandissement des épreuves photographiques, consiste à obtenir rapidement des épreuves très-nettes, non déformées et conservant la vigueur de tons des épreuves obtenues à la chambre noire. A l'origine, les photographies amplifiées laissaient beaucoup à désirer sous tous ces rapports; mais, à force de recherches, on est arrivé à une perfection remarquable. A l'Exposition universelle de 1867, on a pu admirer un magnifique portrait en pied de M. Ingres, et une vue agrandie de la cathédrale d'Amiens, qui, composée seulement de quatre morceaux, ne mesurait pas moins de 2 mètres de largeur sur $2^{m},50$ de hauteur. Appliquée à l'astronomie, nous verrons que cette méthode d'agrandissement a donné, entre les mains d'opérateurs savants et habiles, des résultats déjà remarquables.

On comprend l'importance de ce procédé, non pas tant pour les vues ordinaires, pour les portraits, mais pour la reproduction des objets dont les détails multipliés échappent au crayon du dessinateur le plus habile et le plus patient. Le vœu qu'Arago formait dans son rapport sur l'invention de Daguerre, de voir obtenir les images fidèles des milliers d'hiéroglyphes dont sont recouverts les monuments de l'antique Égypte, ce vœu est réalisé aujourd'hui, grâce au procédé d'agrandissement des épreuves photographiques.

Si l'image, de quelques centimètres de diamètre, d'un astre comme la Lune, peut se transformer ainsi en une épreuve d'un mètre et plus, et permet d'étudier à loisir la configuration orographique de notre satellite, combien la méthode d'agrandissement n'est-elle pas plus précieuse encore en fixant les

milliers d'images des objets naturels qui, par leur petitesse, échappent à la vue! Pour obtenir ce résultat, il fallait pouvoir produire des épreuves nettes de ces infiniment petits. C'est un progrès qui a été pareillement réalisé et d'où est résultée toute une branche nouvelle de l'art inventé par Niepce et Daguerre : la *photographie microscopique*.

C'est encore à un de nos compatriotes, M. Bersch, qu'est dû en grande partie ce nouveau pas : les instruments optiques nécessaires à la production des images microscopiques, à leur amplification ultérieure, les dispositions à prendre pour les diverses opérations que cette production exige, ont été inventés par ce savant. D'autres ont contribué à perfectionner ces procédés et à obtenir des épreuves d'une grande perfection : citons, parmi eux, M. Neyt (de Bruxelles), MM. Dagron, Moitessier, Lackerbauer, Girard, en France. Tout le monde connaît ces merveilleuses et imperceptibles photographies, grosses comme une tête d'épingle, qui, enchâssées dans le chaton d'une bague, dans un bijou quelconque, se voient à la loupe avec les dimensions des épreuves ordinaires : portraits, vues, monuments, etc. Adaptés au genre de loupe que nous avons décrit (page 225) sous le nom de *loupe Stanhope*, ces petits objets portent avec eux-mêmes le microscope qui permet de les voir agrandis et dans tous leurs détails. Un point à peine perceptible à l'œil nu y devient une page entière d'un livre qu'on peut lire avec la même facilité que sur l'original. C'est à M. Dagron qu'on doit cette charmante invention.

Ce n'est là, toutefois, qu'un objet de pure curiosité, de fantaisie; mais la photographie microscopique ne s'est point bornée à ces miniatures dont l'intérêt est fort contestable. Elle s'est appliquée à des reproductions utiles, et elle a trouvé un ample domaine dans la micrographie zoologique et végétale.

En présentant à l'Académie des sciences des épreuves microscopiques de diatomées obtenues avec des grossissements variables, M. Girard s'exprimait ainsi sur les moyens employés par lui : « Ces moyens, dit-il, sont identiques à ceux de la

photographie ordinaire, avec cette seule différence que l'objectif à reproduction est remplacé par un autre, très-petit, éclairé par la lumière solaire réfléchie au moyen d'un miroir plan ou concave, suivant les circonstances. Pour donner à cette lumière les qualités photogéniques nécessaires, il est indispensable de la corriger par l'interposition d'un verre d'une nuance bleuâtre. Quand elle manque d'intensité, comme quand on fait usage d'objectifs forts dont la lentille frontale a à peine un millimètre de diamètre, il est nécessaire d'avoir recours à un condensateur.

» La photomicrographie, ajoute ce savant, est un moyen parfaitement exact pour la résolution des *tests* les plus difficiles ; l'image obtenue édifie d'une manière irréfutable sur la valeur du système optique du microscope. Elle permet, au surplus, de constater les différents effets de lumière insaisissables autrement ; l'interférence et la diffraction se traduisent souvent sur quelques diatomées par des combinaisons remarquables. » (*Comptes rendus*, 1869.)

Le même auteur a fait une autre application non moins intéressante de la photographie microscopique en étudiant, à l'aide de la lumière polarisée, les cristaux de certains sels.

En médecine, en physiologie, cette branche de l'art photographique rend des services non moins précieux. M. le docteur Ozanam a imaginé un appareil qui enregistre photographiquement les battements du pouls avec toutes ses phases : il obtient ainsi une ligne ondulée, qui, agrandie, montre toutes les variations qui peuvent se produire dans les pulsations pendant le court intervalle de la cent-millième partie d'une seconde.

En résumé, les innombrables découvertes que le microscope a fait faire dans le domaine des sciences naturelles, la photomicrographie les fixe, et permet, par l'agrandissement des épreuves, de les étudier d'une façon permanente.

Pendant le siége de Paris par les Prussiens, cette application de la physique a rendu des services d'un autre genre. Elle a permis de réduire à une surface de quelques centimètres

carrés les plus longues et les plus volumineuses dépêches que les pigeons emportaient ainsi sous leur aile de la province à Paris. L'organisation de cette poste microscopique fut commencée à Tours sous la direction d'un photographe de cette ville, M. Blaise. C'était d'abord sur papier que se faisaient les épreuves réduites : sur chaque côté de la feuille, on pouvait reproduire deux pages d'imprimerie ; mais le grain du papier limitait la finesse du texte, et, de plus, le temps de pose (en hiver) était considérable. Aussi le système que M. Dagron, envoyé à Tours de Paris par ballon, proposa à la Délégation fut-il préféré (fin novembre 1870). Ce photographe opérait sur de minces pellicules de collodion très-légères et assez sensibles pour n'exiger que deux secondes de pose, au lieu de deux heures. Voici, à ce sujet, quelques détails tirés d'une brochure publiée par M. Dagron.



Fig. 210. — Photographie microscopique. Fac-simile d'une dépêche expédiée à Paris pendant le siége.

« Chaque pellicule était la reproduction de douze ou seize pages in-folio d'imprimerie, contenant en moyenne, suivant le type employé, trois mille dépêches. La légèreté de ces pellicules a permis à l'administration d'en mettre sur un seul pigeon jusqu'à dix-huit exemplaires, donnant un total de plus de cinquante mille dépêches pesant ensemble *moins d'un demi-gramme*. Toute la série des dépêches officielles et privées que nous avons faites pendant l'investissement de Paris, au nombre d'environ cent quinze mille, pesaient *en tout un gramme*. Un seul pigeon eût pu aisément les porter. Si l'on veut maintenant multiplier le nombre des dépêches par le nombre d'exemplaires fournis, on trouve un résultat de plus de deux millions cinq cent mille dépêches que nous avons faites pendant les deux plus mauvais mois de l'année.

» On roulait les pellicules dans un tuyau de plume que des

agents de l'administration attachaient à la queue du pigeon. Leur extrême souplesse et leur complète imperméabilité les rendaient tout à fait convenables à cet usage. En outre, ma préparation sèche a le triple avantage : d'être apprêtée en une seule fois, de ne donner aucune bulle, et de ne pas se détacher du verre à la venue de l'image ; elle donne toute sécurité dans le travail, et n'expose pas aux déboires comme les procédés ordinaires. »

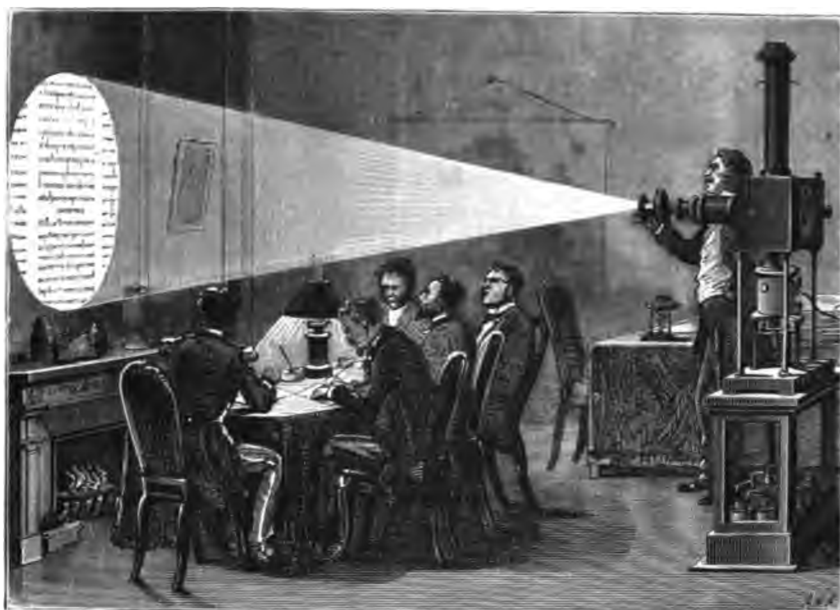


FIG. 211. — Agrandissement et lecture des dépêches microscopiques pendant le siége de Paris.

Arrivées à Paris, les dépêches microscopiques étaient soumises à l'agrandissement et projetées par un microscope solaire qu'éclairait la lumière électrique sur un écran blanc. Là, on pouvait prendre copie de leur contenu. La transparence des pellicules collodionnées rendait cette projection facile et la lecture du texte se faisait aisément.

C'est assurément là une des plus ingénieuses et des plus utiles applications que la science physique et l'art de la photographie aient pu rendre, trop tard malheureusement, pour l'intérêt suprême de la défense nationale.

CHAPITRE VIII

HÉLIOGRAVURE — PHOTOLITHOGRAPHIE

---

§ I — Procédés divers de fixation au charbon ou aux encres grasses

Quelque procédé qu'on emploie pour le fixage des épreuves daguerriennes ou photographiques, il est certain qu'elles n'ont point la solidité que donne l'impression ordinaire faite avec des encres grasses à peu près indestructibles. On est bien parvenu, il est vrai, à reproduire pour ainsi dire indéfiniment, par le tirage, une photographie quelconque, et à augmenter ainsi les chances de conservation de l'image obtenue; mais chaque épreuve positive peut s'altérer à la longue, sa netteté disparaître sous l'influence prolongée de la lumière; et enfin, à supposer que ce problème de fixation fût résolu, il y aurait encore, dans le mode de tirage des positives, une infériorité sur le tirage typographique et lithographique des gravures, celle de la cherté relative et de la longueur des opérations.

Il n'est donc pas étonnant qu'on ait cherché, dès l'origine, à faire disparaître cette infériorité en transformant le cliché photographique en une véritable planche de gravure en relief ou en taille-douce, ou de lithographie. C'est ce problème que

poursuivit Niepce dès ses premiers travaux, et que nombre de savants ou d'artistes ont cherché à résoudre depuis. Disons un mot des résultats auxquels ils sont parvenus et des principales méthodes qu'ils ont inventées.

Dès 1841, M. Fizeau cherchait à reproduire par la galvanoplastie les images des plaques de Daguerre : le cuivre déposé par la pile se moulait sur la surface dont il reproduisait en creux les reliefs, c'est-à-dire tous les points où se trouvaient disséminées les gouttelettes de mercure formant les clairs ou les lumières. En se servant de ce moule pour obtenir un cliché inverse, on reproduisait la plaque elle-même qu'il ne s'agissait plus que d'imprimer par les procédés ordinaires de l'impression des gravures. Malheureusement, les reliefs et les creux étaient si peu accusés, qu'on ne reproduisait ainsi que des images confuses.

On a cherché alors (MM. Berres, Donné) à obtenir des planches en faisant attaquer à l'eau-forte les plaques daguerriennes. M. Grove a associé les deux méthodes précédentes en faisant attaquer la plaque par un des éléments d'une combinaison voltaïque qui agit inégalement sur les deux métaux, l'argent et le mercure.

Enfin, M. Fizeau imagina un procédé qui transformait les plaques daguerriennes en planches de gravures en taille-douce. Il faisait attaquer à chaud l'image par un acide mixte composé avec les acides nitrique, nitreux et chlorhydrique : les parties blanches restaient intactes ; les noires étaient attaquées, et il se formait un chlorure d'argent adhérent dont la couche insoluble arrêtait l'action de l'acide. On enlevait cette couche avec une dissolution d'ammoniaque, et l'action de l'acide continuait à creuser la planche. Enfin, pour obtenir plus de profondeur, M. Fizeau dorait les parties saillantes, qui se trouvaient ainsi mises à l'abri d'une action ultérieure de l'acide nitrique. L'argent étant un métal peu dur et ne permettant dès lors qu'un tirage limité, la planche était cuivrée par les procédés galvaniques (aujourd'hui on acière les planches de cuivre).

C'étaient là certainement des essais remarquables; mais, comme bientôt la photographie sur papier et sur verre collodionné ou albuminé se substitua au procédé primitif de Daguerre, les tentatives de gravure des plaques daguerriennes furent abandonnées.

Vers 1853, M. Niepce de Saint-Victor obtint des gravures sur acier de la façon suivante : Il recouvrait la planche à graver d'une couche d'un vernis impressionnable formé de bitume de Judée, de benzine, de cire et d'éther sulfurique additionné de quelques gouttes de lavande. Il appliquait sur la plaque sèche un cliché positif sur papier ou sur verre, et exposait à la lumière, comme pour obtenir une épreuve. Enfin, la plaque impressionnée étant passée à l'huile de naphte mélangée de benzine, était attaquée par un mélange d'acide nitrique étendu et d'alcool. La gravure était achevée à l'eau-forte.

Parmi les procédés nombreux inventés depuis pour le tirage des épreuves photographiques à l'encre grasse, il faut citer le procédé dit *au charbon* inventé par M. Poitevin. Nous ne ferons qu'en indiquer sommairement le principe, et nous n'insisterons que sur les résultats, parce que ce procédé est une annexe de l'art photographique, non une application proprement dite de la physique : ce serait plutôt une application de la chimie.

Voici les termes mêmes dans lesquels M. Poitevin décrit son procédé :

« Pour reproduire à l'encre grasse sur papier, pierre lithographique, surface métallique ou bois, la contre-épreuve d'un dessin photographique, on applique sur la surface qui doit recevoir le dessin une ou plusieurs couches d'un mélange à volumes égaux d'une solution concentrée d'albumine, fibrine, gomme arabique ou succédanées, et d'une solution concentrée d'un chromate ou bichromate à base alcaline terreuse ou métallique, ne précipitant pas la matière organique de sa dissolution. Ordinairement on emploie le bichromate de potasse; après dessiccation ou avant, si l'impression doit être faite à la chambre noire, on expose à la lumière, et, après l'insolation, on applique

au tampon ou à la presse une couche uniforme d'encre grasse ou de couleur, on détache l'encre par lavage : l'encre ne reste que sur les parties impressionnées par la lumière. »

Pour obtenir des reliefs ou des creux par l'action seule de la lumière, sans employer les procédés de morsure aux acides, ni le travail du burin, en un mot pour produire des planches gravées par la lumière seule, soit typographiquement, soit en taille-douce, voici comment agissait le même inventeur. Il coulait sur une surface quelconque une couche uniforme d'une dissolution de gélatine imprégnée de bichromate de potasse. Après dessiccation, il recouvrait la plaque d'un cliché positif ou négatif obtenu par la photographie, et soumettait le tout à l'action directe ou diffuse de la lumière. La même plaque pouvait être exposée au foyer de la chambre noire, dans le cas où l'on voulait opérer d'après nature : « Après l'impression, on plonge dans l'eau la couche de gélatine ; alors toutes celles de ses parties qui n'ont pas reçu l'impression lumineuse s'en imprègnent, la gélatine se gonfle et donne des reliefs, tandis que les parties qui ont été impressionnées, s'humectant peu, forment les creux. Les reliefs correspondent donc aux noirs du dessin et les creux aux blancs. »

Ainsi s'obtenait une planche gravée sur gélatine, qu'on transformait ensuite en planche sur cuivre par les procédés ordinaires de la galvanoplastie.

Le procédé au charbon ou aux encres grasses ne justifie donc son nom que par le tirage des épreuves de la gravure qui se fait par les moyens d'impression à l'encre d'imprimerie. La solidité des épreuves tient à l'emploi de cette encre, où le charbon (noir de fumée) entre comme matière colorante. Mais, en réalité, c'est sur les propriétés qu'ont des substances organiques (albumine, gomme, gélatine) imprégnées de bichromates alcalins, d'être impressionnées par la lumière et de devenir insolubles, qu'est basé tout le procédé.

L'invention due à M. Poitevin n'eut pas du reste le succès qu'il en attendait : les parties de l'image les plus vigoureuses

venaient seules, les demi-teintes étaient emportées, parce que, comme le reconnut M. Laborde, la couche impressionnée a une



FIG. 212. — Fac-simile d'une gravure héliographique.

faible épaisseur, et que la couche de gélatine sous-jacente se dissolvait dans l'eau et emportait avec elle les parties les plus



SPÉCIMEN D'HÉLIOGRAVURE.

à l'impression. Mais ce mode d'impression est lui-même absolument original. Il consiste à verser une encre fluide (gélatine colorée au charbon ou autrement) sur le cliché, à placer au-dessus de l'encre la feuille de papier à imprimer, et à soumettre le tout à la presse. Qu'arrive-t-il alors?

C'est que la feuille de papier, pressée par une plaque de verre, fait sortir par les bords du moule tout l'excès d'encre, et les creux seuls se trouvent remplis. Aussitôt l'encre séchée et durcie, le papier enlevé de la presse emporte avec lui la couche gélatineuse colorée. Celle-ci forme alors sur le papier un dessin en relief, qui dure d'ailleurs peu de temps. Mais partout où l'épaisseur de l'encre est plus considérable, la teinte est plus forte, elle va en se dégradant jusqu'au blanc, en raison inverse du degré d'épaisseur, c'est-à-dire de la forme du moule, ou enfin selon la force des demi-teintes et des lumières.

Il nous est impossible de donner ici même une idée sommaire des nombreux procédés de gravure héliographique et de photolithographie inventés dans ces dernières années : la plupart, du reste, peuvent être considérés comme dérivant du procédé Poitevin, étant basés presque tous sur l'impressionnabilité de la gélatine chromatée et sur l'insolubilité que cette substance acquiert sous l'influence de la lumière. Mais nous ne serons que juste en citant les noms des inventeurs et les procédés Nègre, Baldus, Placet, Garnier et Dujardin, Tessié du Motay, Jeanrenaud, Albert (de Munich).

Les résultats obtenus sont certes fort remarquables ; mais ils pèchent presque tous par un point : la difficulté de suffire à un tirage à grand nombre d'exemplaires. Tant que cette difficulté ne sera pas résolue, l'héliogravure laissera à désirer ; elle ne pourra répondre aux besoins de l'industrie artistique, de la librairie actuelle, qui exigent le bon marché, impossible sans un grand tirage.

§ III — Héliochromie

Disons aussi quelques mots d'un problème dont la solution est beaucoup moins avancée que celle de la gravure photographique, mais qui néanmoins a déjà été l'objet d'essais intéressants. Nous voulons parler de la reproduction des couleurs dans les images, sans autre intervention que celle de la lumière. On a donné à cette application particulière de l'art photographique et de la physique le nom d'*héliochromie*.

Quand on regarde sur l'écran de la chambre noire l'image du paysage qui s'y trouve reproduit en miniature, tous les objets représentés se peignent au foyer comme en un miroir, avec toute la variété des nuances et des couleurs dont ils sont revêtus dans la nature. On comprend qu'on ait eu la pensée de fixer ainsi cette image si fidèle, mais comment? Existe-t-il une substance sensible qui non-seulement puisse être impressionnée différemment selon la couleur des rayons lumineux qui la frappent, mais garde encore cette impression exacte et la rende aux yeux telle qu'elle l'a reçue?

Tel est le problème dans toute son étendue. Il est loin d'être résolu; cependant ce qui a été déjà fait dans cette voie permet d'espérer que la solution n'en est pas impossible.

Dès 1848, M. Edmond Becquerel annonçait à l'Académie des sciences qu'il était parvenu à fixer sur une même couche sensible le spectre solaire avec toutes ses couleurs. Il prenait une feuille de plaqué d'argent à la surface de laquelle il déposait une couche de chlorure par l'immersion dans une dissolution d'acide chlorhydrique actionnée par la pile. Quand la couleur de la couche sensible atteignait, pour la seconde fois, une teinte violet rose, il la soumettait à la lumière d'un spectre obtenu à l'aide d'une lentille. « La couche sensible s'impressionne alors en rouge dans le rouge, en jaune dans le jaune.

en vert dans le vert, en bleu dans le bleu et en violet dans le violet. La teinte rougeâtre tourne au pourpre, à l'extrême rouge et même s'étend au delà de la raie A de Fraunhofer; quant à la teinte violette, elle continue bien au delà de H en s'affaiblissant graduellement. En laissant continuer l'action du spectre, les teintes se foncent et l'image finit par prendre l'éclat métallique; les couleurs ont alors disparu. »

Les couleurs ainsi obtenues se conservaient quelque temps dans l'obscurité; mais elles disparaissaient à la lumière du jour, et M. Becquerel ne parvint point à les fixer.

Chose curieuse, la lumière blanche s'imprime en noir sur la plaque; mais, en recuisant celle-ci à une température de 80° à 100°, la lumière blanche produit une impression blanche.

En appliquant sur la plaque chlorurée une gravure coloriée, M. Edmond Becquerel obtint aussi, par une exposition suffisamment prolongée à la lumière solaire, la reproduction des couleurs de l'image; mais il fallait interposer un écran de sulfate de quinine pour empêcher l'action des rayons ultra-violets, qui eussent donné à toute l'image une teinte grisâtre.

M. Niepce de Saint-Victor, en modifiant la manière d'opérer de M. Becquerel, est aussi parvenu à reproduire les couleurs de gravures enluminées, et même à obtenir le noir en même temps que toutes les autres couleurs. La plaque sensible demande alors une préparation particulière : elle est recuite jusqu'au violet bleu et ensuite recouverte d'un vernis à la dextrine et au chlorure de plomb. « J'ai reproduit par contact, dit-il, une gravure enluminée représentant un garde-française : les diverses couleurs de l'uniforme se sont reproduites; le chapeau noir, ainsi qu'une des guêtres (l'autre avait été découpée et recouverte d'un papier blanc), ont impressionné la plaque d'une manière très-sensible, en donnant une teinte plus ou moins foncée, suivant la préparation de la plaque. La découpure a donné du blanc. »

M. Niepce de Saint-Victor a en outre reconnu que la plus

ou moins grande concentration de la dissolution de chlore qui sert à préparer la plaque sensible influe sur le développement de telle ou telle couleur. Avec une dissolution faible, c'est la couleur jaune qui vient le plus aisément; en augmentant progressivement le chlore dissous, on obtient le vert bleu, puis l'indigo, le violet; et enfin les couleurs les moins réfrangibles, l'orangé et le jaune, exigent la solution la plus concentrée. Un autre résultat intéressant est celui-ci : les chlorures métalliques exercent une influence analogue, ou plutôt qui dépend de la couleur que chacun d'eux donne à la flamme de l'alcool. Ainsi, qu'on ajoute à la dissolution une certaine quantité de chlorure de sodium, qui donne une flamme jaune dans l'alcool, c'est le jaune qui se développe avec le plus d'intensité; ce sera le vert avec le chlorure de cuivre, le rouge avec le chlorure de strontium.

Malheureusement ces résultats, qui offrent un grand intérêt au point de vue de la science, n'ont pu entrer dans la pratique de l'art photographique. Ces couleurs données par la lumière ne restent sur la plaque sensible qu'autant qu'elles sont conservées dans l'obscurité complète; on ne peut les observer qu'à la hâte, et, à la lumière du jour, elles ne tardent point à s'évanouir. Tous les efforts tentés jusqu'ici pour les fixer ont échoué.

Parmi les tentatives faites dans la même voie que celle de M. Ed. Becquerel et Niepce de Saint-Victor, il faut citer celles de M. Poitevin, qui a obtenu la plupart des couleurs du spectre, principalement les couleurs rouge, orangé et jaune, sur un papier au sel d'argent recouvert d'une couche formée par une solution d'un bichromate alcalin, mélangée elle-même d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre et d'une dissolution à 5 pour 100 de chlorure de potassium. Du papier ainsi préparé, soumis à l'insolation pendant dix minutes à travers une peinture sur verre, en reproduit les couleurs; mais ces couleurs ne se conservent pas non plus à la lumière.

Ne pouvant résoudre le problème dans son intégrité, quelques chercheurs ont essayé une autre voie. S'inspirant sans

doute des procédés de la chromolithographie, ils ont songé à obtenir séparément les couleurs dont la combinaison est susceptible de reproduire les couleurs des objets. Avec trois épreuves, dont l'une donnerait le rouge, la seconde le jaune, la troisième le bleu, on pourrait, par superposition ou réunion, obtenir les couleurs composées. Deux photographes, MM. Cros et Ducos du Hauron, indiquèrent séparément cette solution; mais le second seul la mit en pratique. Voici, d'après l'*Annuaire photographique* de M. Davanne, quel est son procédé :

On tire d'abord trois épreuves négatives, dont l'une servira à faire le positif rouge, la seconde le positif jaune, la troisième le positif bleu. « Pour faire le négatif bleu, il faut éteindre toutes les teintes bleues simples ou composées du sujet à reproduire, afin qu'elles n'aient aucune action sur la couche sensible : pour cela, on doit prendre l'épreuve à travers un verre rouge orangé. Après une pose, qui sans doute doit être fort longue, on obtient une image dans laquelle le bleu et les composés n'ont eu qu'une très-faible action sur la couche sensible, tandis que le jaune est suffisamment accusé. Le cliché représentant le négatif du rouge s'obtient en éteignant les rayons rouges au moyen d'un verre vert. Pour le jaune, on prend l'épreuve en interposant un verre violet.

» Ces trois clichés servent à faire chacun une épreuve positive qu'on peut obtenir avec des mélanges de gélatine et de bichromate de potasse additionnés de la matière colorante nécessaire, soit un mélange rouge, un jaune, un bleu. Les surfaces gélatinées étant prêtes sur subjectiles transparents, on les impressionne sous les clichés correspondants. Celui obtenu avec le verre bleu violacé est posé sur la couche jaune, et, par le lavage, on obtient une épreuve monochrome jaune; le cliché obtenu avec le verre vert est employé sur la gélatine rouge; celui qui résulte de l'interposition du verre rouge orangé est mis sur la gélatine bleue. Après exposition, développement, dessiccation des images, celles-ci sont superposées et donnent

l'épreuve polychrome avec toute la série des dégradations de teintes. »

Les épreuves obtenues par M. Ducos du Hauron montrent que les choses se passent ainsi que l'indiquent les idées théoriques qui l'ont amené à formuler son procédé. C'est donc un résultat intéressant, mais il s'en faut encore que le véritable problème de la fixation des couleurs naturelles soit résolu.

§ IV — Application de la photographie aux arts et aux sciences physiques et naturelles

Tels sont, dans leurs traits les plus essentiels, les procédés de cet art nouveau, l'une des applications les plus originales des lois de la physique combinées avec celles de la chimie. Tels sont les principaux progrès réalisés depuis Daguerre. Nous n'avons fait, bien entendu, que donner une idée des méthodes diverses qui constituent la pratique photographique, en essayant de les rattacher aux principes de la science ; mais tout n'est pas expliqué encore dans les réactions que détermine l'influence des ondes lumineuses, et c'est aux physiciens et aux chimistes, plus qu'aux photographes de profession, même les plus habiles, qu'incombe la tâche de dissiper l'obscurité qui règne encore sur ce point.

Telle qu'elle est, la photographie a déjà rendu aux arts et aux sciences les plus éminents services. Elle est elle-même, à un certain point de vue, un art qui exige de ceux qui le cultivent des facultés indépendantes de l'habileté technique. Le choix des sujets, dans le portrait comme dans le paysage, l'arrangement des poses, l'étude de l'éclairement le plus favorable à une reproduction véritablement artistique, supposent des facultés que l'éducation peut développer si le sentiment intime préexiste, mais qui ne sont pas données à tous les praticiens, quelque familiarisés qu'ils soient avec les manipulations photographiques.

Quant aux services rendus aux sciences et aux arts par la photographie, ils sont, nous le répétons, incontestables. Grâce à elle, les productions de l'art dans tous les pays du monde sont reproduites avec une fidélité irréprochable. Cela est de toute évidence pour les vues des monuments d'architecture, ainsi que pour les œuvres de la sculpture. Tous les objets en relief offrent une netteté dans les détails et dans l'ensemble, une exactitude dans le dessin, que la gravure égale à grand'peine, qu'elle ne peut, en tout cas, surpasser. D'ailleurs, les vues photographiques de ce genre sont les plus utiles auxiliaires du dessinateur, du graveur ou du peintre. Il n'en est pas tout à fait ainsi pour les tableaux peints, parce que les diverses couleurs n'ont pas la même action photogénique sur les substances impressionnables : ainsi, les bleus viennent plus clairs, les jaunes et les verts sont souvent noirs ; de sorte que la reproduction d'un tableau peint, bonne pour le dessin, est en général médiocre au point de vue de la couleur. Les copies de ce genre n'en ont pas moins le charme d'une fidélité que les copies peintes ne peuvent égaler en ce qui concerne le dessin et l'ensemble.

Les *fac-simile* des gravures anciennes ou rares, dont les planches originales ont disparu ou sont usées, sont admirablement reproduits par la photographie, et, là encore, celle-ci rend et ne cessera de rendre aux artistes et aux amateurs des services signalés.

Les réserves qu'il faut faire au point de vue purement artistique n'existent plus, si nous passons aux applications de la photographie aux sciences positives, physiques et naturelles.

La géographie, l'ethnologie, l'anthropologie, en profitent les premières. La reproduction des sites, des montagnes, de leur profil, de leurs dispositions naturelles, celle des villes, des monuments, des ports, des habitants des divers pays, de leurs costumes, des objets de toute sorte, ustensiles, armes, etc., sont désormais à l'abri de l'inhabileté des dessinateurs, de l'infidélité souvent involontaire, quelquefois voulue, des narra-

teurs, voyageurs, et ne permettent aucune exagération, ni flatterie, ni dénigrement. Quelle précieuse ressource, surtout pour les anthropologistes, qui peuvent rassembler ainsi les types vrais de toutes les races humaines et de leurs innombrables variétés !

L'histoire naturelle, la médecine, l'anatomie et la physiologie ne sont pas moins intéressées aux applications de la photographie par les ressources infinies qu'elles peuvent en tirer



FIG. 213. — Microscope photographique.

pour leurs études spéciales. Les préparations qui ne peuvent se conserver qu'à grands frais, les anomalies végétales ou animales, ou humaines, une fois fixées par la lumière avec leurs véritables formes, leurs particularités les plus minutieuses, ainsi multipliées pour les savants, multiplieront de même les sujets d'étude en servant de base certaine à la discussion des hommes de science. Grâce à la photomicrographie et aux procédés d'agrandissement, l'étude des tissus végétaux et animaux, celle des êtres infiniment petits que révèle le microscope, reçoivent

et recevront de plus en plus un secours immense. Il est inutile d'en développer les raisons. Ce que nous avons dit pour l'homme et les races humaines, on peut le répéter pour les innombrables espèces animales et végétales, que des dessinateurs d'une grande habileté savent sans doute reproduire, mais non sans beaucoup de temps et de travail. D'ailleurs ces dessinateurs de talent sont rares. Chaque explorateur, chaque voyageur dans des contrées inexplorées ou mal connues ne peut prétendre à posséder cet art difficile. Muni d'un appareil photographique, et des substances convenables, il peut obtenir, avec un travail et un temps relativement minimes, une masse considérable de documents, qui auront surtout cela de précieux, qu'aucun doute ne peut subsister sur la fidélité de l'agent qui les a dessinés et fixés, c'est-à-dire de la lumière.



Fig. 214. — Diatomée discoïde : *Arachnoidiscus*. — Fac-simile d'une photographie microscopique.

De l'infiniment petit, la photographie peut passer à l'infiniment grand. Les phénomènes célestes n'ont pas échappé à son action. On a photographié le Soleil et ses taches, la Lune et ses montagnes, les éclipses et les particularités physiques qu'elles ont offertes. On s'est essayé sur les planètes et sur les constellations étoilées. Le dernier mot n'est pas dit sur les services que l'astronomie retirera peut-être un jour de cet art merveilleux; mais on a exagéré ceux qu'elle a déjà reçus, et, en tout cas, on n'a pas toujours bien compris le véritable rôle de la photographie astronomique et l'influence qu'elle peut avoir sur les progrès de la science elle-même. Il n'est donc pas, croyons-nous, hors de propos de préciser à cet égard. Or, nous ne pouvons mieux faire que de reproduire ici textuellement ce qu'a dit sur ce sujet, dans une conférence faite en 1868, un astronome qui a autant d'expérience et de science que de

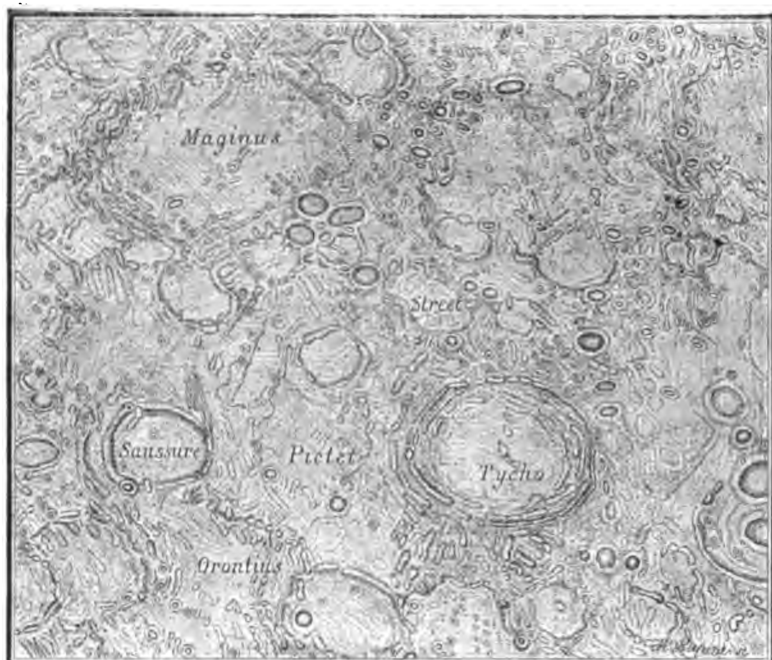
modestie, l'auteur de la *Sélénographie*, le vénérable Mædler :

« La plupart des personnes qui m'écoutent, dit-il, peuvent encore se rappeler qu'aussitôt après la découverte de la photographie, on entendit exprimer des espérances qui n'ont d'analogues que celles de Descartes et de ses contemporains à la suite de la découverte des lunettes astronomiques. On plaignait les malheureux savants qui avaient passé toute leur vie sans interruption à observer, à mesurer et à dessiner. Non-seulement on devait faire la même chose sans peine et dans un temps bien moindre, mais on devait obtenir des résultats bien meilleurs, beaucoup plus exacts, beaucoup plus détaillés qu'anciennement. Ce qui m'a coûté sept années, la détermination de la surface de la Lune, devait être bien mieux fait en sept secondes.

» Aujourd'hui, trente années se sont écoulées depuis la découverte de Daguerre; comment ces espérances ambitieuses ont-elles été exaucées?

» Warren de la Rue en Angleterre, William Cranch Bond en Amérique, et d'autres, ont mis courageusement la main à l'œuvre. Ils ont adapté de puissantes lunettes astronomiques à des appareils photographiques, et ils sont également arrivés à donner à leurs appareils, pendant le court intervalle de temps nécessaire à la production des épreuves, le même mouvement que les corps célestes dont ils se proposaient de voir l'image. Ainsi la Lune a été photographiée dans ses différentes phases; mais les détails sont restés bien au-dessous de ceux qu'un habile observateur peut déterminer. Bond s'est occupé des étoiles fixes, et il disposait d'une lunette astronomique permettant d'apercevoir les étoiles de quatorzième grandeur; mais il n'a pu obtenir que des images faibles, à peine visibles, des étoiles de cinquième grandeur.

» Nous pourrions citer, il est vrai, des dessins très-précieux que nous devons à la photographie astronomique; mais ce ne sont point les détails du ciel étoilé que l'on peut atteindre de cette manière et que l'on peut conserver ainsi : ce sont des



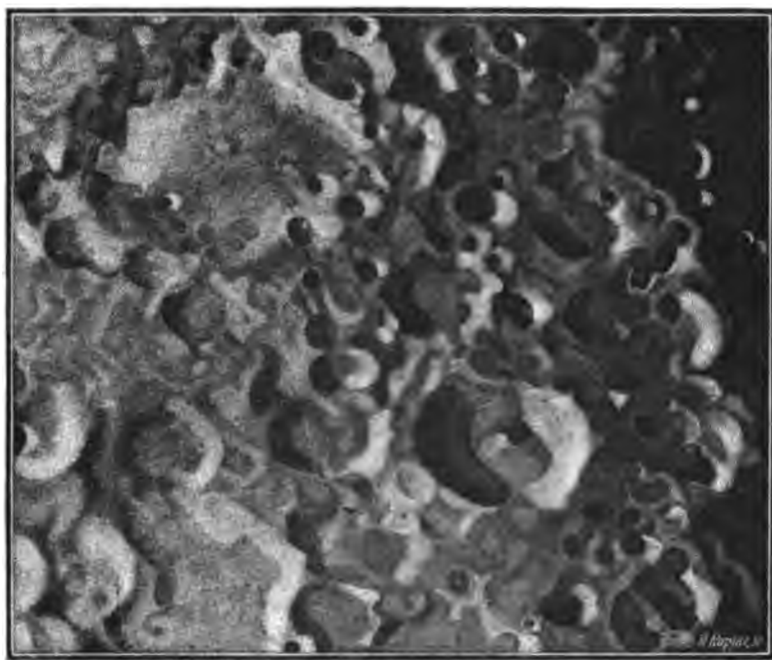


PLANCHE XVI — PHOTOGRAPHIE CÉLESTE

Montagnes lunaires, d'après une photographie de M. Warren de la Rue. — La même région, dessinée d'après la carte de la Lune de Beer et Mædler.

phénomènes relatifs aux objets connus depuis longtemps et réfléchissant une forte lumière.

» Je citerai, en premier lieu, les taches du Soleil, dont le dessin demande une faible fraction de seconde, et qui sont reproduites avec une grande netteté. Cependant, même dans cette circonstance, on n'arrive point à fixer les détails que de bons observateurs habitués à ces phénomènes peuvent reproduire; mais on obtient, ce qui est très-important dans l'espèce, une image du Soleil pour un moment déterminé, et, si l'on nous permet de nous servir d'une expression de sir John Herschel, on oblige le Soleil à nous écrire sa propre histoire.

» Ces expériences seront, ou, pour parler plus exactement, ont déjà été très-utiles, particulièrement dans les éclipses totales de Soleil. Il n'y a pas de dessinateur, quelque expéditif qu'on le suppose, qui puisse faire en deux ou trois minutes, durée ordinaire du phénomène, ce que Warren de la Rue a fait en Espagne lors de la dernière éclipse de Soleil; car, si l'on suppose que tout ait été préparé, on peut obtenir, non pas seulement trois, mais douze ou quinze images d'un phénomène qui disparaît si rapidement. Pour les planètes, même pour les grosses, la photographie est de peu d'usage et nous apprendra peu de choses nouvelles. L'expérience sera encore moins utile quand elle s'appliquera aux étoiles. On a photographié le groupe des Pléiades et celui d'Orion, et l'on pouvait bien reconnaître les constellations dans les images ainsi obtenues; mais un œil sain, sans lunettes, voyait plus de choses dans le ciel que la photographie ne lui en montrait. Nous nous félicitons du nouveau moyen d'étude que plusieurs observatoires, parmi lesquels nous citerons l'observatoire de Wilna, possèdent d'une façon complète, ou peu s'en faut; mais nous n'attendrons pas que la sphère d'action de l'astronomie pratique puisse être agrandie par son intervention, et l'art des observations ne sera pas bouleversé par la découverte de la photographie, comme il l'a été lors de l'invention de la lunette d'astronomie. »

La planche XVI, qui représente deux portions identiques de

la Lune, permettra de constater l'exactitude du jugement porté par Mædler : l'une est un fac-simile de la carte sélénographique dessinée par l'illustre astronome; l'autre est la reproduction d'une belle photographie lunaire amplifiée, due à M. Warren de la Rue. Dans celle-ci, le relief de la surface est admirablement accusé par les oppositions des lumières et des ombres ; mais on n'y distingue point une foule de détails topographiques d'un grand intérêt que l'astronome, aidé de puissants instruments, a dessinés nettement, et qui font de sa belle carte de la Lune un monument précieux pour les futures recherches de sélénographie.

LIVRE IV

APPLICATIONS
DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DE LA CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

LE CHAUFFAGE

§ 1 — Anciens procédés de chauffage

Parmi les intempéries qui peuvent nuire à la santé de l'homme et lui interdire, dans une certaine mesure, le libre exercice de ses facultés physiques ou intellectuelles, les brusques variations des températures, les extrêmes du froid et de la chaleur, sont de celles qui l'affectent davantage et contre lesquelles il lui importe le plus de se prémunir. Les régions de la terre où règne, selon l'expression consacrée, un printemps perpétuel, sont rares; en tout cas, elles sont peu peuplées. Même dans les zones tempérées, il existe un écart notable entre les chaleurs de l'été et les froids de l'hiver. De plus,

à mesure que la civilisation envahit des espaces de plus en plus grands du nouveau et de l'ancien continent, les voyages se multiplient, la colonisation peuple des contrées nouvelles, et l'homme se trouve exposé à vivre dans des milieux où les excès

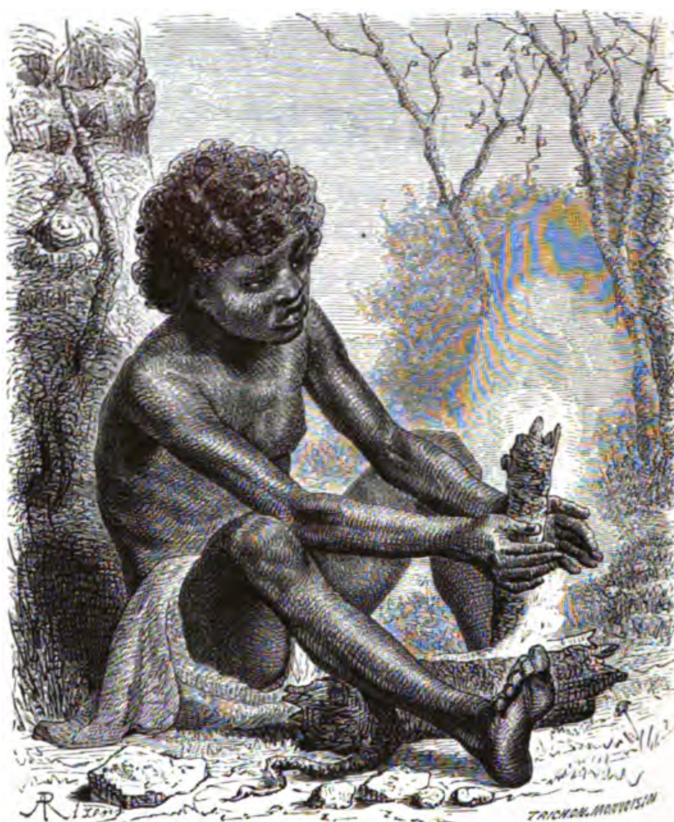


FIG. 215. — Sauvage faisant du feu.

de température, s'ils ne sont pas combattus dans leurs effets, rendent pour lui l'acclimatation difficile, et sont, en tout cas, dangereux pour sa santé.

De là l'obligation de combattre ces effets, qu'ils soient funestes ou simplement désagréables, par des moyens appropriés, et de régler l'usage de ceux-ci selon les lois de la physique et de l'hygiène.

Ces moyens sont de diverses natures. Ils s'appliquent aux

habitations, aux vêtements, même à la nourriture et aux boissons; et il est clair qu'on peut les classer en deux catégories principales, selon qu'ils ont pour objet de combattre l'excès du froid ou l'excès de la chaleur.

Parlons d'abord du chauffage, qui est surtout une nécessité pour les habitants des zones glaciales et tempérées.

Le moyen le plus naturel, le plus primitif de se préserver du froid, est d'allumer un feu aux rayonnements duquel on s'expose directement. Nos ancêtres des âges de la pierre n'en



FIG. 216. — Brasero.

connaissaient sans doute pas d'autres; ils allumaient en plein air des feux qui servaient à la cuisson de leurs aliments, comme font encore, non-seulement beaucoup de peuplades sauvages, mais nos soldats, lorsqu'ils sont en campagne. Toutefois il y eut dès le début un progrès notable dans ce mode de chauffage, c'est celui qui a consisté à mettre le foyer à l'abri dans les premières habitations humaines, dans les cavernes, puis de là dans les huttes construites en bois et en branchages ou en pierres.

Combien de temps s'écoula-t-il avant que l'on connût les cheminées? Bien des siècles sans doute, et la fumée s'échappait

au dehors de la hutte, soit par l'unique ouverture qui en formait la porte et les fenêtres, soit, comme chez les Gaulois, les Germains, et aujourd'hui même chez les Esquimaux et vingt autres peuplades à demi sauvages, par un trou pratiqué à la partie supérieure du toit.

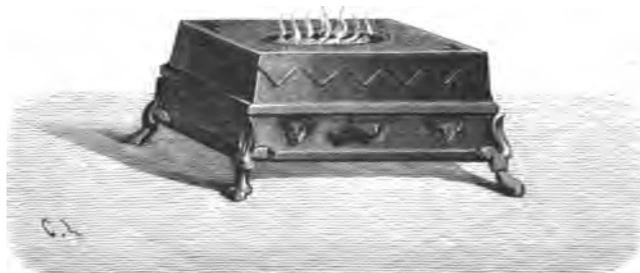


FIG. 217. — Foculus des Romains.

Mais nous ne voulons point faire ici l'histoire des progrès du chauffage, ni rechercher si les anciens, Romains ou Grecs, connaissaient les cheminées, ou si ces utiles appareils n'ont fait



FIG. 218. — Le chauffage chez les anciens. — Trépieds des Grecs.

leur apparition qu'au moyen âge dans les habitations occidentales. Que des innovations qui nous paraissent aujourd'hui si simples aient tant tardé à se produire, cela n'a rien d'extraordinaire, si l'on songe que la civilisation actuelle s'est propagée du Midi et de l'Orient vers l'Occident et vers le Nord. Les Grecs passaient une grande partie de leur vie en plein air, et le doux

climat des îles de l'Archipel et de la péninsule Hellénique n'exigeait pas des précautions exceptionnelles contre le froid de la saison hivernale. On se contentait d'adoucir la température des habitations en plaçant sur des trépieds, des brasiers formés de charbons allumés sous la cendre chaude, moyen de chauffage qui n'était ni bien efficace, ni bien hygiénique. On retrouve encore dans les pays méridionaux, en Grèce, en Italie, en Espagne, sous le nom de *braseros*, les *trépieds* des Grecs et les *foculi* des Romains.

Arrivons donc aux appareils de chauffage usités dans les temps modernes, et commençons par les *cheminées*.

§ II — Chauffage par les cheminées

C'est encore le mode de chauffage le plus généralement employé en France. Le foyer où a lieu la combustion est formé d'une cavité pratiquée le plus ordinairement dans l'un des murs principaux, ou de refend, de l'habitation. Il est surmonté d'un conduit cylindrique ou prismatique, par lequel s'échappent la fumée et les autres gaz produits par la combustion, et dont l'orifice extérieur s'élève au-dessus des toits.

Dans les cheminées ordinaires, la combustion se fait aux dépens de l'air de la chambre, qui perd ainsi son oxygène, et dès lors a besoin d'être sans cesse renouvelé. Ce renouvellement a lieu grâce à un phénomène que nous connaissons tous, sous le nom de *tirage*. Ce n'est autre chose qu'un mouvement ascendant de l'air et des gaz chauds qui s'échappent du foyer. Au début, quand on allume le feu, l'air extérieur, celui qui remplit le conduit de la cheminée et l'air de la chambre sont en équilibre. La chaleur du feu échauffe les couches d'air inférieures, qui deviennent moins denses, et dès lors tendent à s'élever et s'élèvent en effet. L'air plus froid des couches supérieures comble le vide déterminé par cette ascension, et produit d'abord

un courant descendant plus énergique que le courant ascendant : il arrive alors assez souvent que la fumée se trouve rabattue dans la chambre.

Mais, dès que la colonne d'air chaud s'est élevée jusqu'à l'orifice extérieur du tuyau de la cheminée et remplit tout le conduit, le courant ascendant vertical domine et le tirage exerce tout son effet, toutefois à une condition : c'est que l'air de la chambre, à mesure qu'il cède son oxygène au foyer, soit constamment remplacé par de l'air nouveau. Si, pour une cause quelconque, ce remplacement ne pouvait s'effectuer, l'activité du tirage diminuerait peu à peu, et, avec elle, l'activité de la combustion. Il en résulterait, d'une part, le rabattement de la fumée, et, d'autre part, la viciation de l'air de la chambre privé de son oxygène, remplacé par des gaz irrespirables ou vénéneux, tels que l'acide carbonique et l'oxyde de carbone.



Fig. 219. — Tirage dans une cheminée ordinaire.

Le tirage est donc aussi utile à l'hygiène qu'au bon fonctionnement d'une cheminée.

Maintenant, comment remplit-on la dernière condition dont nous venons de parler? Où prend-on l'air nouveau pour remplacer celui qu'enlève à la chambre la combustion activée par le tirage?

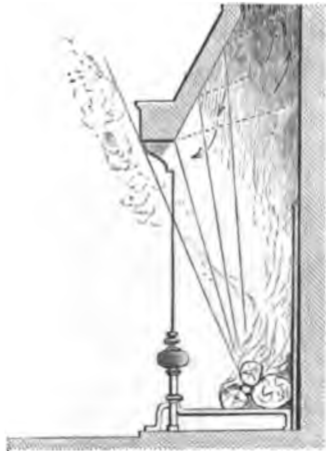
Dans les anciennes cheminées, c'est par les fissures des portes et des fenêtres que se faisait cette introduction. Aussi presque toujours ces cheminées fumaient quand les ouvertures étaient bien closes, comme il devait arriver dans les habitations neuves. En tout cas, il y avait là un inconvénient grave, celui des courants d'air, qui affectaient désagréablement les personnes assises au coin du feu : personne n'ignore combien les *vents coulis* ont déterminé de rhumes ou d'affections rhumatismales; et à la vérité il ne manque pas aujour-



PLANCHE XVII — UNE CHEMINÉE AU MOYEN AGE

d'hui, dans nos habitations, de pièces où les cheminées, construites à l'ancienne mode, produisent les mêmes effets, c'est-à-dire l'alternative peu agréable et peu hygiénique de la fumée ou des courants d'air.

La construction d'une cheminée d'après toutes les données de la science, est un art qui ne remonte pas bien haut. Sous Louis XIV, non-seulement dans les habitations particulières,



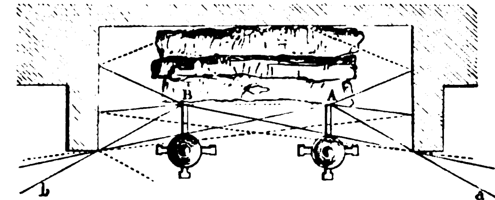
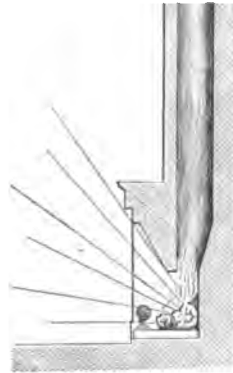


FIG. 220. — Ancienne cheminée : utilisation et perte de chaleur.



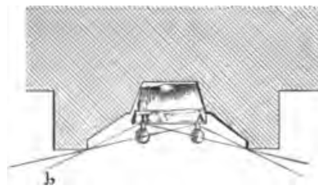


FIG. 221. — Cheminée moderne : rayonnement de la chaleur.

mais dans les palais du grand roi, on se chauffait mal en faisant de très-grands feux. Pour éviter les vents coulis, on se servait de paravents ; et cela ne suffisait pas toujours, puisque Louis XIV lui-même, pendant l'hiver, se tenait dans ses appartements, calfeutré dans une sorte de caisse de voiture ou de siége qui ne laissait arriver l'air d'aucun côté. Du reste, comme nous allons le voir, ce n'est pas seulement le mode de tirage qui était défectueux ; l'utilisation de la chaleur développée par la combustion était aussi mauvaise que possible.

Comment, en effet, un feu de cheminée chauffe-t-il l'air de la chambre et les objets qui s'y trouvent renfermés? Directement d'abord par le rayonnement de la flamme et des charbons incandescents. Or, dans les anciennes cheminées, où le foyer était au fond d'une vaste cavité carrée limitée de chaque côté par des jambages, et à la partie supérieure par une hotte ou une tablette, qui, les uns et les autres, faisaient obstacle au rayonnement, une faible partie des rayons de chaleur se trouvait utilisée. Aujourd'hui, ou mieux depuis Gauger[1] (1713) et Rumford, on avance le foyer de manière à donner un plus vaste



FIG. 222. — Cheminée ordinaire moderne.

champ au rayonnement direct. De plus, on limite l'intérieur des jambages par des surfaces, disposées obliquement ou même de forme parabolique, en faïence polie ou en cuivre; de cette façon, les rayons qui n'ont pas accès dans la pièce sont renvoyés par réflexion, et contribuent ainsi au chauffage.

L'ouverture de la cheminée est rétrécie par en haut au point où commence le tuyau de fumée, ce qui a le double avantage d'activer le tirage et d'empêcher la fumée de se répandre dans la pièce. Cet effet est encore augmenté par l'usage de *tabliers*

1. Auteur d'un ouvrage dont voici le titre : *La Mécanique du feu, ou l'Art d'en augmenter les effets et d'en diminuer la dépense: Traité des nouvelles cheminées qui échauffent plus que les cheminées ordinaires et qui ne sont point sujettes à fumer.* Paris, MDCCXIII.

mobiles, pièces de tôle qu'on abaisse ou qu'on élève à volonté au devant du foyer, et qui remplacent avantageusement le soufflet.

Le chauffage d'une pièce par une cheminée se fait non-seulement par rayonnement, mais par convection, c'est-à-dire par le transport des parties échauffées qui montent vers le plafond et sont remplacées par l'air froid, incessamment appelé du dehors. De là résulte une ventilation naturelle, ordinairement plus que suffisante au point de vue hygiénique; mais aussi l'air nouveau, étant froid, doit sans cesse être échauffé par le foyer,

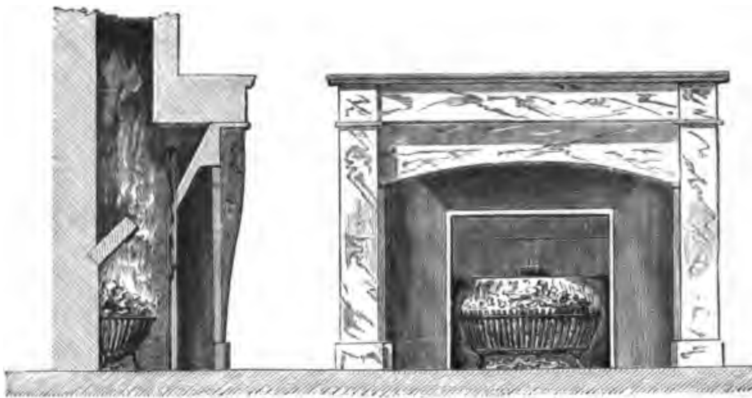


FIG. 223. — Cheminée moderne à tablier mobile.

dont la chaleur est ainsi mal utilisée. Comme, enfin, le conduit de fumée emporte une grande quantité des gaz chauds de la combustion [1], le rendement calorifique de ces cheminées est très-faible, ce qui a conduit à des dispositions plus rationnelles et fait imaginer ce qu'on nomme les *cheminées ventilatrices*.

1. D'après le général Morin, l'air appelé par une cheminée en sort souvent à une température de 60°, 80°, 100° et plus. La perte de chaleur s'élève aux $\frac{6}{7}$, aux $\frac{7}{8}$, et plus, de cette chaleur dispersée; le rendement calorifique d'une cheminée ordinaire ne dépasse donc guère 14 centièmes, 12 centièmes de la chaleur développée par le combustible.

§ III — Les Cheminées ventilatrices

Le principe des *cheminées ventilatrices* est celui-ci : au lieu d'appeler du dehors, par les fissures des portes et fenètres, ou même par des ventouses et des conduits latéraux, l'air nécessaire au tirage et indispensable au renouvellement de l'air vicié d'une chambre, il s'agit de ne laisser entrer l'air nouveau et froid qu'après en avoir élevé la température à l'aide du foyer lui-même. On fait donc circuler l'air pris au dehors dans des conduits qui contournent le foyer, et, une fois échauffé, on le fait déboucher par des ventouses dans la pièce même, dont il contribue ainsi à élever la température.



Fig. 224. — Cheminée ventilatrice de Douglas Galton.

Diverses dispositions ont été imaginées dans ce but. Nous en reproduisons deux des plus simples :

Dans l'une (fig. 224), l'air arrive du dehors dans un conduit qui enveloppe entièrement le tuyau cylindrique de tôle de la fumée et aussi une partie du foyer; il s'échauffe ainsi et s'élève jusqu'à une ouverture pratiquée près du plafond dans la cloison de la chambre. C'est donc à la fois de l'air chaud et de l'air nouveau non vicié, qui remplace l'air consommé par l'acte de la combustion ou entraîné par le tirage.

Dans l'autre cheminée (fig. 225), le foyer est formé d'un appareil de fonte, et le conduit de la fumée se divise en plusieurs conduits par où passent les gaz chauds de la combustion. Tout l'appareil échauffe ainsi la chambre dans laquelle arrive l'air du dehors, et celui-ci, en s'échappant par deux bouches de chaleur laté-

rales, quand sa température est élevée par le contact des parois de l'appareil, contribue à la fois à chauffer l'appartement et à le ventiler. Le rendement calorifique des cheminées ventila-

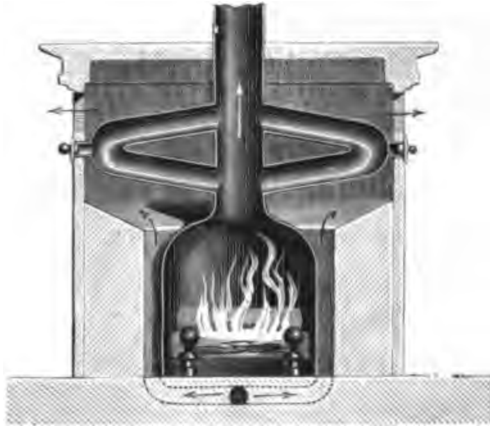


Fig. 225. — Cheminée ventilatrice, système Joly.

trices est notablement supérieur à celui des cheminées ordinaires. Il peut s'élever jusqu'à 30 pour 100 de la chaleur développée par le combustible.

§ IV — Les Poêles

Les *poêles* ne diffèrent réellement des cheminées que par ce point : ce sont des appareils de chauffage installés au milieu de la pièce même qu'il s'agit de chauffer, au lieu d'être adossés ou mieux enchâssés dans la maçonnerie des murs. Il en résulte que l'échauffement des parois se communique de tous côtés, par voie de rayonnement, à l'air de la pièce, et que la chaleur du foyer est ainsi beaucoup plus complétement utilisée. Le principe du tirage est le même; mais, comme le foyer n'est visible que par une étroite ouverture, il n'y a presque pas de rayonnement direct de la flamme ni des charbons incandescents. Le tirage n'en est pas moins vif, au contraire; mais la quantité d'air évacué est relativement assez faible, de sorte que la

ventilation est généralement insuffisante. Hygiéniquement parlant, les poêles constituent un mode de chauffage inférieur aux cheminées.

La forme en est très-variée, ainsi que la matière dont ils sont formés. Les poêles de fonte, grâce à la grande conductibilité du métal, s'échauffent très-rapidement; les parois rougissent, et, outre la chaleur insupportable résultant de cette incandescence, des inconvénients graves en sont la conséquence. Un de ces inconvénients provient de la haute température à laquelle l'air se trouve porté, à l'état de sécheresse qui en est la suite et qui affecte les organes de la respiration ; on y remédie en plaçant sur le poêle un vase plein d'eau ; celle-ci s'évapore lentement et fournit à l'air de la pièce l'humidité indispensable. Un autre inconvénient plus grave a été signalé récemment. La chaleur rouge de la fonte détermine la formation d'un gaz, l'oxyde de carbone, gaz éminemment toxique, même quand il est mélangé à l'air dans une très-faible proportion. Selon les uns, le métal incandescent devient perméable aux gaz de la combustion par un phénomène d'exosmose ou de dialyse étudié par divers savants, Graham, Henri Sainte-Claire Deville, etc. Selon d'autres, le gaz dont il s'agit est formé aux dépens des poussières organiques qui viennent se brûler au contact des parois du poêle, ou encore il provient de la décomposition de l'acide carbonique de l'air par le métal incandescent. Quelle que soit la cause de cette formation, le phénomène a été constaté, et avec lui l'insalubrité des poêles de fonte, toutes les fois du moins que ces appareils sont chauffés au point de porter leurs parois au rouge.

Les poêles de brique, de faïence, de terre réfractaire, ou même les poêles métalliques revêtus intérieurement d'une paroi de terre contenant le foyer, n'ont pas cet inconvénient : ils s'échauffent d'ailleurs bien moins vite, à cause de la faible conductibilité de la matière de leurs enveloppes ; mais d'autre part, pour la même raison, ils conservent longtemps la température à laquelle ils sont portés, et l'usage en est beaucoup plus hygié-

nique que celui des poêles de fonte, dont le principal avantage est d'être très-économique. Nous avons dit plus haut que la ventilation se fait beaucoup moins bien avec le chauffage des poêles qu'avec les cheminées. Leur rendement calorifique est aussi beaucoup plus considérable : il atteint aisément 85 et 90 pour 100 de la chaleur développée par le combustible, tandis



FIG. 226. — Poêle calorifère et ventilateur.

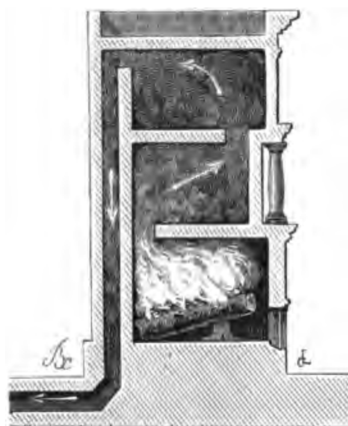


FIG. 227. — Coupe d'un poêle des pays du Nord.

que la ventilation déterminée par le tirage est tout à fait insuffisante. Selon M. Morin, l'air d'une chambre chauffée par un poêle se renouvelle au maximum une fois en dix heures.

La figure 226 représente un poêle calorifère, dont la disposition est fort avantageuse, au double point de vue de la ventilation et de l'utilisation du combustible. La ventilation y est assurée par un tuyau de prise d'air qui arrive au-dessous du foyer en A; un robinet P permet de régler cette introduction d'air nouveau, et par suite le tirage. La fumée, en s'échappant

latéralement, chauffe l'air enfermé dans l'enceinte L, d'où cet air se répand par des ventouses latérales dans l'appartement. L'enveloppe B empêche en outre les effets nuisibles qui pourraient résulter de l'échauffement trop considérable des parois de

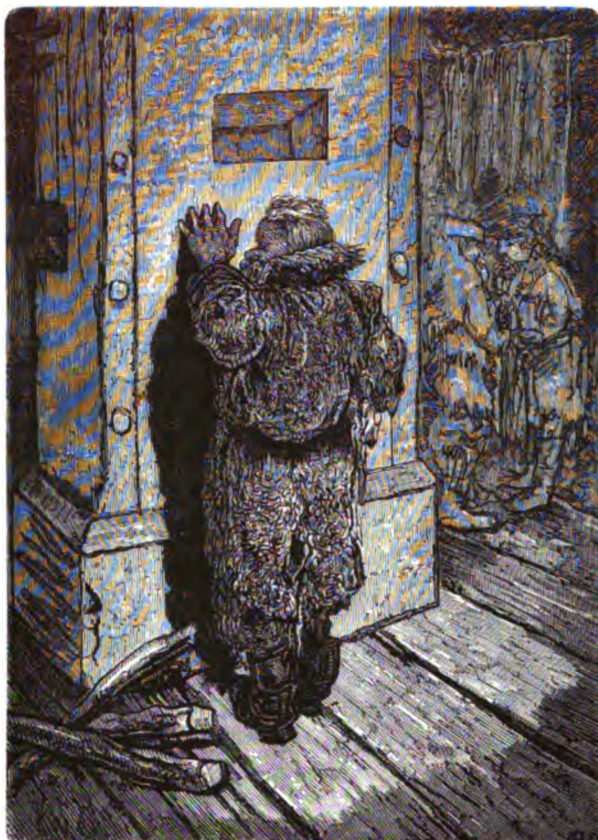


FIG. 228. — Un poêle en Russie.

fonte qui contiennent le combustible. La charge de charbon ou de coke se fait par en haut, en enlevant le couvercle supérieur.

Dans les pays du Nord, en Allemagne, en Russie, en Suède ou en Norvége, les poêles sont de véritables monuments construits en brique et revêtus de faïence ou de porcelaine. La prise d'air (fig. 227) s'y fait extérieurement par un conduit qui

pénètre dans le poêle et s'échauffe, avec l'air qu'il renferme, au contact des gaz chauds du foyer, pour se répandre ensuite, par des bouches de chaleur, dans l'appartement. D'autres fois l'intérieur du poêle est simplement divisé en chambres ou compartiments superposés, à l'intérieur desquels circulent la fumée et les gaz de la combustion. C'est alors simplement par le rayonnement de l'enveloppe qu'a lieu le chauffage. Ordinairement, il suffit de tenir le poêle allumé pendant quelques heures de la matinée, puis de fermer les ouvertures quand la masse tout entière du combustible est devenue incandescente : la faible conductibilité de la terre et de la faïence vernie qui forme l'enveloppe extérieure maintient la chaleur de l'appareil pendant la journée tout entière.

CHAPITRE II

LE CHAUFFAGE — LES CALORIFÈRES

---

§ I — Les Calorifères a circulation d'air chaud

On doit réserver le nom de *calorifères* à des appareils de chauffage destinés à communiquer à distance la chaleur produite par la combustion du foyer, et à la répandre dans un certain nombre d'appartements distincts du local où ils sont eux-mêmes installés.

Les uns ont une ressemblance plus ou moins grande avec les cheminées ventilatrices ou avec les poêles munis de chambres intérieures ou de bouches de chaleur, parce que c'est de l'air chaud qu'ils envoient dans les diverses pièces qu'ils ont pour objet de chauffer. Ce sont les *calorifères à air chaud.*

D'autres sont construits sur un autre principe. Le véhicule de la chaleur émanée du foyer est l'eau échauffée au contact de celui-ci et circulant dans des tuyaux qui la conduisent, dans l'épaisseur des murs, sur tous les points où il s'agit d'élever la température. Ce sont les *calorifères à circulation d'eau chaude.*

Enfin, il y a un troisième système de calorifères, où la chaleur empruntée au foyer est celle de la vapeur d'eau portée à l'ébullition; en circulant dans des conduits, cette vapeur se refroidit,

se condense, et cède toute la chaleur qui provient de ce changement d'état aux corps qui environnent l'espace où elle est renfermée, ainsi que l'air en contact avec eux. Ce sont les *calorifères à vapeur d'eau.*

Passons successivement en regard les appareils de ces trois systèmes, en signalant leurs avantages et leurs inconvénients respectifs.

Les foyers des calorifères à air chaud sont le plus souvent installés dans les caves des édifices qu'ils sont appelés à chauffer,

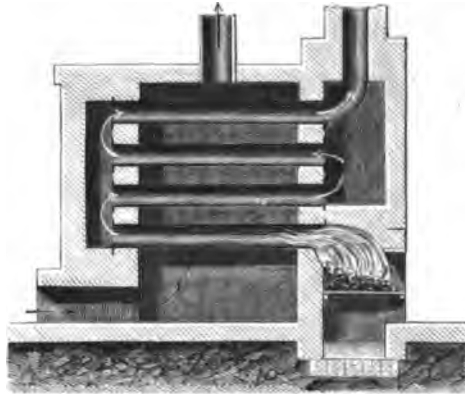


FIG. 229. — Calorifère à circulation d'air chaud.

au milieu d'une chambre dont l'air est renouvelé par une prise extérieure, mais qui n'est point en communication directe avec le foyer lui-même, de manière que la fumée ou les autres gaz de la combustion n'y aient aucun accès. Le conduit qui reçoit la fumée et ces gaz se replie plusieurs fois sur lui-même ou se divise en un certain nombre de conduits, tantôt horizontaux (fig. 229), tantôt verticaux, disposition qui a pour objet d'augmenter la surface de chauffe, et d'utiliser ainsi autant que possible la chaleur développée par le combustible. Disons tout de suite qu'à cet égard les conduits verticaux sont beaucoup plus avantageux, parce que l'air chaud qui s'élève ne rencontre dans son mouvement que les parois latérales des tuyaux horizontaux, tandis qu'il

reste pendant tout le temps de son ascension en contact avec la surface entière des tuyaux verticaux.

Pendant que la fumée et les gaz de la combustion s'élèvent dans la cheminée, après avoir cédé à la chambre du calorifère une grande partie de leur chaleur, l'air chaud de cette chambre s'élève dans un tuyau central qui se divise en plusieurs tuyaux. Chacun de ceux-ci va déboucher aux divers étages et dans les diverses pièces de l'édifice par des ouvertures qu'on peut fermer en totalité ou en partie. Le mélange de cet air avec celui de la pièce en élève la température, mais ne contribue point à la ventilation, si celle-ci n'est pas assurée d'une façon indépendante. Le rendement calorifique de ces appareils peut varier entre 60 et 80 centièmes.

L'air arrive souvent dans les appartements à une température trop élevée. Pour obvier à cet inconvénient, on le fait traverser, en sortant du calorifère, une capacité où arrive de l'air froid. Des ouvertures munies de registres permettent d'y opérer le mélange, de façon à obtenir une température moyenne, de 30° à 40°, par exemple.

Pour les mêmes raisons, le chauffage des calorifères à air chaud peut être aussi insalubre que celui des poêles. L'air qu'il fournit est sec; l'oxyde de carbone ou d'autres gaz malsains peuvent filtrer au travers des tuyaux métalliques. Enfin, l'égalité de température est loin d'être assurée par ce système.

§ 11 — Calorifères a circulation d'eau chaude et de vapeur. — Chauffage par le gaz

Sous ces derniers rapports, le chauffage par circulation d'eau chaude est préférable. La température de l'air échauffé par ce moyen est plus modérée et plus régulière. Il est aisé de se rendre compte de ces avantages.

Les *calorifères à circulation d'eau chaude* sont installés

comme les appareils que nous venons de décrire dans l'étage inférieur de l'édifice. Le foyer chauffe directement l'eau d'une chaudière C. Le liquide, dilaté par cette élévation de température, s'élève, par l'effet de la diminution de sa densité, dans un tuyau vertical qui la conduit à l'étage le plus haut. Là il communique

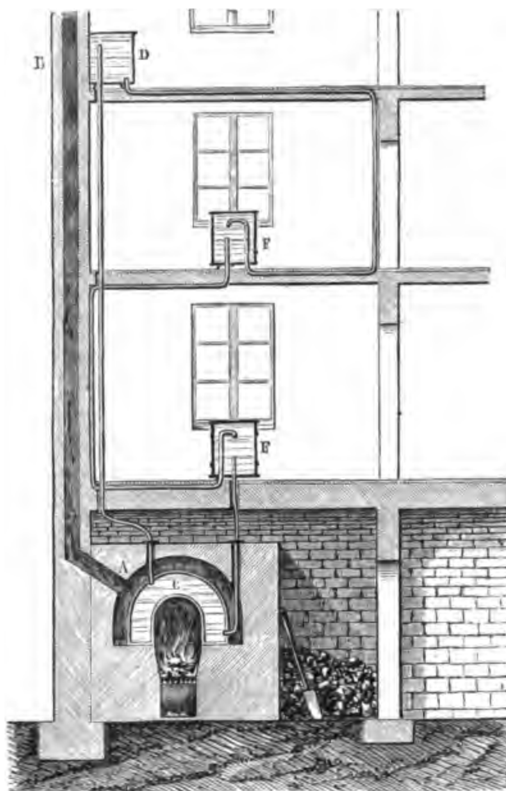


Fig. 230. — Calorifère à circulation d'eau chaude.

sa chaleur à l'eau d'un réservoir ou capacité formant une sorte de poêle, D, qui rayonne dans la pièce où il est installé et en échauffe l'air. Un conduit descend de ce réservoir dans un poêle semblable F, situé à l'étage immédiatement inférieur, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'eau, ramenée à son point de départ et refroidie par cet échange incessant, vienne s'échauffer de nouveau dans la chaudière et y reprenne le même mouvement.

Il est aisé de concevoir que cette circulation est continue; qu'elle commence aussitôt, pour ainsi dire, que le foyer est allumé, et qu'elle atteint le maximum de vitesse, quand la différence maximum de température et de densité entre l'eau de la chaudière et celle du réservoir supérieur est elle-même atteinte. Les tuyaux de communication servent également au chauffage des pièces. Le réservoir supérieur est muni d'une ouverture par laquelle on remplit d'eau l'appareil, et par où se dégage, soit l'air expulsé, soit la vapeur provenant d'une trop forte élévation de température.

Bonnemain, architecte du XVIII[e] siècle, est l'inventeur des calorifères à circulation d'eau chaude qu'on emploie encore aujourd'hui sans modifications essentielles. L'eau n'y atteint d'ordinaire qu'une température inférieure à 100 degrés; pour cette raison, on les nomme appareils *à basse pression*.

Le chauffage par circulation d'eau chaude peut se faire aussi en portant le liquide à de hautes températures, à plus de 300 degrés, par exemple. On emploie alors les calorifères *à haute pression de Perkins*, du nom de l'inventeur de ce système. L'eau circule dans des tuyaux qui n'ont alors aucune communication avec l'air libre, et qui montent et descendent d'un étage à l'autre dans les épaisseurs des murs ou sous les planchers, comme dans le système précédent; seulement ces tubes, construits solidement en fer et soigneusement joints, se contournent en spirales ou serpentins, K,H,E, à chaque étage, depuis le foyer, où ils reçoivent directement l'action de la chaleur, jusqu'aux pièces des étages supérieurs, où ils remplissent une série de capacités en forme de cheminées ou de poêles, D,G,J, ainsi que le représente la figure 231. Au-dessus du serpentin de l'étage le plus élevé, se trouve un vase d'expansion *a* contenant une certaine quantité d'air que l'eau comprime quand sa température s'élève, de façon à éviter l'effet de l'expansion du liquide et de la vapeur qui se forme, vapeur dont la pression peut atteindre un nombre considérable d'atmosphères.

Le chauffage par circulation d'eau chaude à haute tempéra-

ture est sujet à de graves inconvénients. Il peut causer un incendie en déterminant la combustion des pièces de bois voisines des tuyaux. En cas de fuite, dans les joints ou les fissures des tuyaux, la vapeur qui se forme et s'échappe peut occasionner des explosions, des brûlures dangereuses.

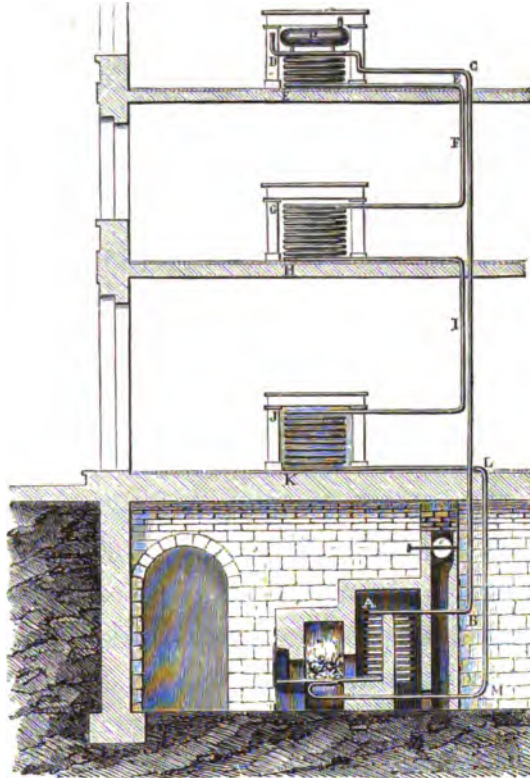


FIG. 231. — Calorifère à circulation d'eau chaude : système Perkins, à haute pression.

Un troisième mode de chauffage par la circulation de la vapeur d'eau est basé sur la grande quantité de chaleur qu'abandonne la vapeur en se condensant. Il n'exige que des tuyaux de faible dimension; mais divers inconvénients, l'inégalité de température provenant des négligences du chauffage, les condensations qui en résultent, les chocs, les ruptures, les explosions, ont fait renoncer à ce mode de chauffage, qui n'est

plus guère employé que dans les usines, où il est économique d'utiliser la vapeur quand elle s'échappe des machines.

Un système mixte, très-avantageux, est celui qu'a imaginé un ingénieur, M. Grouvelle. Il consiste à combiner le chauffage par circulation d'eau chaude avec le chauffage par la vapeur. Celle-ci est employée à échauffer l'eau des poêles installés dans les divers étages ou pièces d'un édifice, comme on vient d'en voir la description dans les calorifères à circulation d'eau chaude, à air libre. Les hôpitaux, les prisons, les grands bâtiments d'administration chauffés par ce système, le sont à la fois hygiéniquement et économiquement.

Il nous reste à signaler un mode de chauffage qui se recommande à certains égards et pour des usages spéciaux, sinon au point de vue économique, du moins par sa propreté, sa commodité, mais qui n'est possible que dans les villes. Nous voulons parler du chauffage par le gaz. Mais il ne faut pas s'y tromper, il n'y a rien là que la substitution d'un combustible à un autre, et les appareils imaginés pour l'application de ce système n'ont qu'un objet : approprier la combustion d'un nombre quelconque de becs de gaz d'éclairage à l'élévation de température d'un poêle, d'un fourneau de cuisine, d'un appareil industriel, etc.

Nous donnons quelques exemples des dispositions adoptées, sans nous étendre davantage sur un mode de chauffage qui est basé sur les mêmes principes que ceux où l'on emploie comme combustibles la houille, le bois, le coke, la tourbe, etc.

§ III — Les Combustibles

Ceci nous amène tout naturellement à dire un mot des *combustibles* eux-mêmes, de leur valeur relative, de la chaleur qu'ils développent; question qui n'est pas indifférente, quand il s'agit de chauffage.

Le bois a été le premier combustible employé, et aujourd'hui

encore des contrées entières n'en emploient pas d'autre. C'est certes le plus agréable, mais c'est aussi l'un des plus coûteux, sauf dans les pays couverts de forêts et éloignés des mines de houille. La houille, l'anthracite, le lignite et autres combustibles minéraux, le coke, qui est le résidu laissé par la distillation de la houille, sont d'un emploi de plus en plus fréquent, parce qu'ils constituent un mode de chauffage plus économique. En certaines contrées, on brûle de la tourbe; en réalité, c'est toujours le règne végétal, celui d'aujourd'hui ou celui des anciennes périodes géologiques, qui fournit l'élément de la chaleur développée dans les divers appareils de chauffage que nous avons passés en revue. A vrai dire, le gaz d'éclairage employé comme combustible est dans le même cas : c'est un des composés de la houille, et ce simple fait suffit à faire voir pourquoi le chauffage par le gaz est plus coûteux que celui par la houille même d'où le gaz est extrait.

Comparons maintenant, d'après les expériences des physiciens, les pouvoirs calorifiques de ces diverses substances. On entend par là le nombre d'unités de chaleur que développe la combustion intégrale d'un kilogramme de chacune :

COMBUSTIBLES	CALORIES	RAPPORTS DES POUVOIRS CALORIFIQUES
Houille	8000	1,00
Anthracite	7500	0,95
Coke	7000	0,90
Lignite	6500	0,80
Charbon de bois	6000	0,75
Tourbe	5000	0,60
Bois sec	4000	0,50
Bois (20 pour 100 d'eau)	3000	0,38
Gaz d'éclairage	10000	1,25

C'est le gaz d'éclairage qui a le pouvoir le plus élevé; viennent ensuite la houille et les combustibles minéraux, puis la tourbe et le bois; le bois humide est inférieur à tous les autres.

On a vu, du reste, de combien il s'en faut que les appareils de chauffage, même les plus perfectionnés, utilisent toute la

chaleur de la combustion. La plus grande partie de cette chaleur s'en va au dehors par la cheminée.

Veut-on se rendre compte des pertes considérables qui s'en vont annuellement en fumée? Prenons la consommation de Paris pour exemple. L'*Annuaire du Bureau des longitudes pour* 1872 nous donne le chiffre de cette consommation pour l'année 1869 :

Bois de diverses sortes..............	994 057	stères.
Charbon de bois....................	4 902 315	hectolitres.
Houille, coke, tourbe................	682 011 827	kilogrammes.

En prenant un chiffre même inférieur à la valeur moyenne de ces divers combustibles, on ne peut guère évaluer à moins de 69 millions de francs la dépense totale, 25 millions pour le bois, 24 millions pour la houille, 20 millions pour le charbon de bois. Mais ce dernier combustible ne sert guère pour le chauffage, et une notable partie de la houille est employée pour des usages industriels. La perte de chaleur n'est pas moins réelle pour les trois genres de combustibles, et l'on peut affirmer que 60 pour 100 au moins s'en vont en fumée, sans être utilisés. C'est donc une perte annuelle de plus de 40 millions de francs, perte qui pourrait certes être réduite de beaucoup, si l'on adoptait partout des appareils rationnellement construits. La bourse des consommateurs et leur santé s'en trouveraient également bien.

Que serait-ce, si l'on appliquait les mêmes calculs à la France entière et à chaque pays dans le monde entier?

CHAPITRE III

APPLICATIONS DIVERSES DES LOIS DE LA CHALEUR
CONDUCTIBILITÉ

---

§ I — Habitations

La température d'un appartement ne dépend pas seulement des appareils de chauffage qui s'y trouvent installés, et de la chaleur que ces appareils communiquent à l'air par voie de rayonnement, de convection ou tout autre mode de propagation calorifique. Elle dépend encore, en premier lieu, de la température extérieure; en second lieu, des murs ou abris qui s'opposent, avec plus ou moins d'efficacité, au passage de la chaleur intérieure au dehors. Cette déperdition inévitable est plus ou moins rapide, selon que les murs sont plus ou moins épais, que les matériaux dont ils sont formés sont de bons ou de mauvais conducteurs de la chaleur; enfin, que les ouvertures dont ils sont percés, et qui sont fermées par des cloisons vitrées pour donner accès à la lumière du jour, sont plus ou moins nombreuses et présentent une surface plus ou moins considérable.

Les murs épais, formés de matériaux mauvais conducteurs, procurent à ceux qui les habitent le double avantage de les protéger, en hiver contre le froid, en été contre la chaleur du

dehors. La pierre, le marbre, sont, sous ce rapport, moins avantageux que la brique et surtout que le bois. Dans les pays froids, en Russie, par exemple, nombre d'habitations rurales ont des murs formés de poutres ou de planches épaisses constituant une double cloison qu'on remplit de matières divisées, de paille hachée, de sciure de bois, de mousse sèche. L'air emprisonné dans les interstices forme avec les matières et les cloisons un ensemble très-peu perméable à la chaleur, très-mauvais conducteur, et, par suite, c'est un excellent abri contre température basse du dehors.

Mais c'est par les portes, les fenêtres vitrées que, pendant le jour, la chaleur se perd avec le plus de rapidité. Un moyen excellent de se prémunir contre cette déperdition consiste dans l'emploi des doubles fenêtres : l'air qui se trouve emprisonné entre les deux minces cloisons vitrées ne se renouvelant pas, et étant un corps mauvais conducteur, constitue une enveloppe protectrice que la chaleur obscure de l'intérieur ne franchit que difficilement, tandis que la chaleur lumineuse des rayons solaires pénètre au contraire avec facilité dans l'appartement. Ainsi se trouve utilisée la propriété des milieux qui sont à la fois diathermanes pour les rayons lumineux et athermanes pour le rayonnement de la chaleur obscure.

Ce double vitrage est très-avantageusement employé dans les serres, dont les plantes ont besoin de la lumière du jour, et qui souffrent quand, pour les préserver du froid, on recouvre le vitrage de paillassons ou d'autres abris opaques.

Les caves sont moins exposées que les appartements des étages supérieurs à l'échange de chaleur qui se fait de dedans en dehors ou de dehors en dedans. Aussi conservent-elles toute l'année une température moyenne qui varie d'autant moins qu'elles sont plus profondes. Elles paraissent donc chaudes en hiver et fraîches en été. Si elles ne peuvent être considérées comme des endroits salubres pour l'habitation, elles servent du moins à la conservation de nombre d'objets qui souffriraient, soit d'un froid excessif, soit d'une chaleur trop élevée.

Les glacières sont des sortes de caves plus profondes que les caves ordinaires, creusées dans le sol et intérieurement revêtues de murailles de brique, où l'on entasse des morceaux de glace pendant l'hiver pour les conserver et s'en servir aux époques de grande chaleur. Après avoir rempli la cavité de fragments de glaçons, on y verse, pendant les fortes gelées, une certaine quantité d'eau qui recouvre le tout d'une couche de glace isolante empêchant l'accès de l'air extérieur; puis on entasse de la paille, qui forme une couche mauvaise conductrice. Un toit recouvert de chaume et de gazon, des plantations d'arbres qui, par leur ombre, préservent la glacière des rayons solaires, achèvent de rendre l'intérieur de la cavité tout à fait imperméable à la chaleur du dehors.



Fig. 232. — Une glacière.

Toutes ces précautions sont basées, comme on voit, sur la faible conductibilité pour la chaleur, du sol, des briques et des matières divisées.

§ II — Vêtements

Des habitations passons aux *vêtements*.

Il n'est guère de contrées où les vêtements ne soient indispensables pour se garantir des intempéries, et surtout des excès de la température, soit en hiver, soit en été. L'homme n'est pas naturellement protégé contre cette action, dont sa santé peut tant souffrir. Il n'est pas, comme la plupart des animaux, couvert d'une enveloppe de poils, de plumes, de

duvet, d'une toison plus ou moins épaisse protectrice des injures de l'air; et c'est à son industrie qu'il a dû recourir, laquelle n'a guère fait qu'imiter la nature d'une façon plus ou moins intelligente, selon le degré de civilisation où il est parvenu.

A l'état de sauvagerie qui caractérise les premiers âges de l'humanité, état dont il existe encore tant de restes, l'homme



FIG. 233. — Vêtements esquimaux.

n'a pu mieux faire que de se couvrir des peaux des animaux tués à la chasse. Ce vêtement primitif est encore celui de maintes peuplades barbares. Dans les climats polaires, les Esquimaux, les Lapons, les Samoyèdes, se vêtent de peaux d'ours, de renne, qu'ils façonnent grossièrement. Le cuir est imperméable à l'humidité, mais ce sont les poils dont il est recouvert qui forment la couche véritablement protectrice contre le froid, à cause de sa faible conductibilité pour la chaleur.

La température du corps humain est à peu de chose près constante dans tous les climats et à toute saison. L'action extérieure ne la modifie pas, pour ainsi dire. « Le sang d'un Lapon, dit Tyndall, est sensiblement aussi chaud que celui d'un Hindou; et le navigateur anglais, en faisant voile du nord au sud ou du sud au nord, trouve que la température de son sang est à peine augmentée à mesure qu'il approche de l'équateur, à peine diminuée à mesure qu'il s'approche du pôle. » Ce qu'il s'agit d'empêcher à l'aide des vêtements, c'est la sensation désagréable que produit sur nous le contact de notre peau avec l'air froid ou avec l'air échauffé fortement par les rayons solaires, ce sont les accidents qui résultent pour notre santé de ce brusque échange.

Il y a trois choses qui rendent un tissu impropre à conduire la chaleur : la nature de la substance dont il est composé, la structure même du tissu, et enfin son épaisseur. Au premier point de vue, voici dans quel ordre se rangent les diverses substances, en allant de la plus conductrice à celle qui l'est le moins. Ces résultats sont dus aux expériences de Rumford : soie tordue, coton ou laine, laine de brebis, taffetas, soie écrue, poil de castor, édredon, poil de lièvre.

On voit par là que la soie est meilleure conductrice que la laine; et comme les tissus de soie sont d'une structure plus serrée que ceux de laine, ces derniers ont donc une double supériorité, tant du côté du tissu que du côté de la matière.

L'expérience journalière confirme ces résultats tirés de l'induction. Les vêtements de laine sont ceux qui préservent le mieux contre le froid, parce qu'ils s'opposent au passage de la chaleur du corps. Ce sont aussi, en été, pourvu que l'étoffe soit légère, ceux qu'il faut préférer pour arrêter les rayons de chaleur et les empêcher de pénétrer jusqu'à notre corps. Du reste, on sait que la couleur a aussi une influence; que les vêtements noirs ou de couleurs sombres émettent la chaleur avec plus de facilité que ceux de couleurs claires ou que les vêtements blancs : de sorte qu'en hiver les derniers sont préfé-

rables aux autres, puisqu'ils sont moins favorables à la déperdition de chaleur du corps. En été, c'est la chaleur extérieure que les vêtements blancs absorbent avec moins de facilité que les vêtements sombres : ils sont donc encore préférables aux autres.

Ce n'est pas le poids de l'étoffe qui rend un vêtement chaud, c'est la structure divisée du tissu ; un édredon, rempli d'un duvet fin et léger, est plus chaud que de lourdes et épaisses couvertures.

On voit, par ces exemples, combien il importe de tenir compte des diverses propriétés calorimétriques des corps, de leur conductibilité, de leur pouvoir rayonnant, absorbant, émissif, dans les applications usuelles relatives au chauffage, à la construction des habitations, aux vêtements ; mais il faut tenir compte aussi des indications de l'hygiène, lesquelles ne sont plus du ressort de la physique, mais de la physiologie. Nous recherchons la chaleur en hiver, le frais en été ; mais il faut savoir dans quelle mesure nous devons le faire, pour que la santé, qui est l'équilibre des fonctions de notre corps, se maintienne constamment en bon état.

§ III — Lampes de sureté des mineurs

On a vu, dans les *Phénomènes de la physique*, comment une toile métallique placée au-dessus d'une flamme de gaz empêche la combustion de se propager au-dessus de la toile. Celle-ci absorbe assez de chaleur, pour que la température du gaz qui a passé par les petites ouvertures du tissu soit au-dessous de la température de l'ignition.

Un illustre physicien, un ingénieur anglais, Davy, a utilisé cette propriété importante pour prévenir, dans les mines, les accidents provenant de l'inflammation du grisou. La lampe de mineur qui porte son nom a reçu, depuis l'époque où elle a été

inventée, des modifications ou des perfectionnements divers; le principe de la construction reste le même. Les figures 234, 235

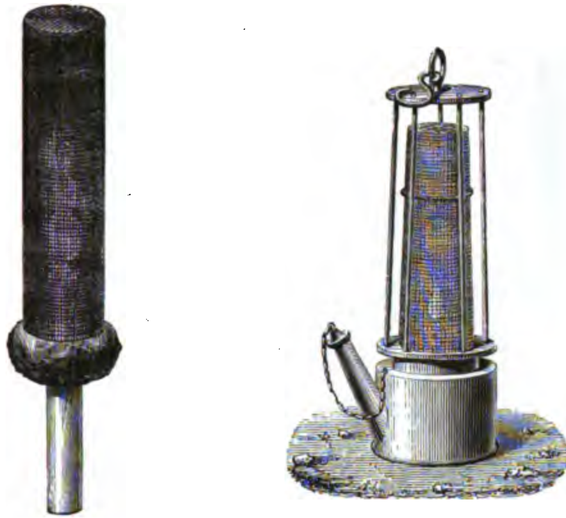


Fig. 234. — Première lampe de sûreté de Davy: lampe à treillis.

et 236, en montrent plusieurs modèles. Dans tous, la détonation qui résulte de l'introduction du mélange explosif dans la

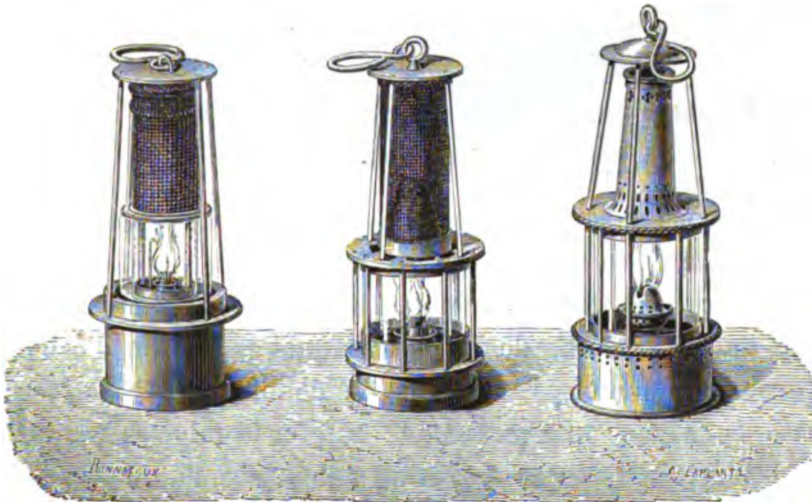


Fig. 235. — Lampes de sûreté des mineurs : lampes à treillis et à tube de cristal.

capacité où brûle la flamme de la lampe est réduite à l'intérieur même. L'enveloppe ou chemise métallique empêche la

chaleur de se propager au dehors, et le mineur est averti du danger sans avoir à en redouter les terribles effets.


Fig. 236. — Coupe d'une lampe Combes.

Les nouveaux modèles de la lampe Davy donnent plus de lumière que les modèles primitifs, la flamme se trouvant entourée de cylindres de verre plus ou moins élevés. De plus, une disposition particulière prévient l'imprudence des mineurs, qui ne peuvent ouvrir leur lampe sans l'éteindre. La lampe Combes, que représente la figure 236, est formée d'un épais cylindre de verre qui enveloppe la flamme, et, au-dessus de celle-ci, d'un tube métallique qui est enveloppé lui-même d'une toile ou treillis métallique. L'air nécessaire à la combustion pénètre latéralement par des ouvertures situées au-dessous de la flamme, à laquelle cet air n'arrive qu'après avoir traversé deux épaisseurs de toiles métalliques.

§ IV — Diverses applications domestiques de la chaleur

Rappelons quelques usages basés sur le faible pouvoir conducteur de certaines substances.

Pourquoi les manches des outils et ustensiles de métal qui vont au feu sont-ils de bois? Pourquoi garnit-on d'osier les anses des bouilloires, de cuir ou d'étoffe celles des fers à repasser? Parce que le bois, le cuir et la laine ont un très-faible pouvoir conducteur. C'est la même raison qui fait paraître ces substances plus chaudes que les métaux, que le marbre, dans une même enceinte où tous les objets ont cependant une même et égale température. Le plancher d'une chambre est moins froid que le carrelage, parce que le bois conduit plus mal la

chaleur que la brique ; un plancher de sapin est moins froid qu'un plancher de chêne pour une raison semblable. Dans tous ces exemples, le contact de la main avec des corps bons ou mauvais conducteurs cause une sensation de froid ou de chaleur, parce que l'échange de chaleur qui se fait dans un sens ou dans l'autre, entre ces corps et notre peau, est plus ou moins



FIG. 237. — Marmite automatique.

rapide. L'impression désagréable qui provient d'une brûlure est due à un échange trop brusque qui peut amener la désorganisation du tissu. La même impression peut résulter du contact avec un objet dont la température est très-basse : telle est celle qu'on ressent en touchant un morceau de mercure congelé. Dans les climats polaires, la main ne peut toucher les objets métalliques, qu'il faut envelopper d'étoffe, si d'ailleurs on ne veut se servir de gants épais.

La faible conductibilité de certaines substances, telles que

la laine, le feutre, a conduit à une application domestique curieuse.

La *marmite automatique* qu'on voyait à l'Exposition universelle de 1867, et qui est utilisée dans les pays du nord de l'Europe, n'est autre chose qu'une marmite métallique où l'on introduit la viande, l'eau et tous les légumes et ingrédients constituant le pot-au-feu. On soumet le tout à la chaleur du foyer jusqu'à ébullition. On enferme alors la marmite dans une boîte dont l'intérieur et le couvercle sont doublés d'une épaisse garniture de feutre; on recouvre en outre la marmite d'un coussin de même matière, on ferme hermétiquement, et l'on peut alors abandonner l'ustensile à lui-même : la cuisson se continue et s'achève sans feu, parce que, grâce à la très-faible conductibilité de l'enveloppe, la chaleur interne conserve une haute température pendant plusieurs heures. Au bout de trois heures, elle s'abaisse en moyenne seulement de 12°.

CHAPITRE IV

APPLICATIONS DIVERSES DES LOIS DE LA CHALEUR
DISTILLATION

§ I — Miroirs et Verres ardents

Est-il vrai qu'Archimède, à l'aide de miroirs ardents, incendia la flotte des Romains qui, sous la conduite de Marcellus, assiégeaient Syracuse? Est-il vrai que Proclus en fit autant à la flotte de Vitalien pendant le siége de Byzance?

Voilà une question qui a été fort controversée, à laquelle Descartes, dans sa *Dioptrique*, a répondu par la négative, que des érudits ont résolue en des sens divers, mais qui prouve tout au moins que les anciens connaissaient la propriété des miroirs concaves de réfléchir à leur foyer et de condenser en un fort petit espace les rayons émanés d'une source de chaleur.

Ils connaissaient aussi les effets de la réfraction à travers une masse de verre taillée en boule ou en lentille, comme il résulte d'un passage fort curieux des *Nuées* d'Aristophane.

La discussion du point historique, d'ailleurs intéressant, dont il s'agit, a eu le mérite de provoquer des expériences qui ont mis hors de doute l'intensité des effets calorifiques qu'on peut produire en rassemblant les rayons du soleil au foyer d'un miroir sphérique ou parabolique, ou encore au foyer d'une ou

plusieurs lentilles. Voici les principaux résultats de quelques-unes de ces expériences d'après l'*Encyclopédie* de Dalembert et Diderot :

« Les plus célèbres miroirs ardents, parmi les modernes, sont ceux de Septala, de Villette, de Tschirnhausen. Le miroir ardent de Manfredus Septala, chanoine de Milan, était un miroir parabolique qui, selon Schot, mettait le feu à des morceaux de bois à la distance de 15 ou 16 pas. Le miroir ardent de Tschirnhausen égale au moins le miroir de Septala pour la grandeur et pour l'effet. Voici ce qu'on trouve sur ce sujet dans les *Acta eruditorum* de Leipzig :



Fig. 238. — Miroir ardent.

« Ce miroir allume du bois vert en un moment, en sorte qu'on ne peut éteindre le feu en soufflant violemment dessus. Il fait bouillir l'eau, en sorte qu'on peut très-promptement y faire cuire des œufs, et, si on laisse cette eau un peu de temps au foyer, elle s'évapore. Il fait fondre en un moment un mélange d'étain et de plomb de trois pouces d'épais : ces métaux commencent à fondre goutte à goutte, ensuite ils coulent continuellement, et en deux ou trois minutes la masse est entièrement percée. Il fait aussi rougir promptement des morceaux de fer ou d'acier, et, peu après, il s'y forme des trous par la force du feu... Le cuivre, l'argent, etc., se liquéfient aussi quand on les approche du foyer. Il fait aussi rougir, comme le fer, les matières qui ne peuvent fondre, comme la pierre, la brique, etc. »

Le miroir de Tschirnhausen avait trois aunes de Leipzig de

large (1^m,69), son foyer était à deux aunes de distance (1^m,13); il était de cuivre et d'une faible épaisseur.

Un ouvrier français de Lyon, Villette, construisit plusieurs grands miroirs dont l'un échut à l'Académie des sciences. C'était un segment d'une sphère de 76 pouces (2^m,06) de rayon, par conséquent de 38 pouces (1^m,03) de foyer; il avait 1^m,27 d'ouverture; la substance dont il était formé était un alliage d'étain, de cuivre et de mercure. Ses effets calorifiques furent comparables à ceux du miroir ardent décrit plus haut.

Buffon fit aussi, au siècle dernier, de curieuses expériences en se servant, pour concentrer les rayons solaires, non plus d'un miroir concave, mais d'une série de miroirs plans disposés de manière à renvoyer vers un seul point les rayons du soleil. « Il a formé un grand miroir composé de plusieurs miroirs plans (il y en avait cent) d'environ un demi-pié en quarré; chacun de ces miroirs est garni, par derrière, de trois vis par le moyen desquelles on peut, en moins d'un quart d'heure, les disposer tous de manière qu'ils renvoyent vers un seul endroit l'image du soleil. M. de Buffon, par le moyen de ce miroir composé, a déjà brûlé à 200 piés de distance. » (*Encyclop.*) En effet, à cette distance, il enflamma du bois; à 140 pieds, il fit fondre du plomb, et à 100 pieds de l'argent.

L'illustre naturaliste et physicien avait voulu réaliser ainsi l'hypothèse d'un poëte grec, Tzetzès, qui croyait que c'était par ce moyen qu'avaient été brûlés les navires romains à Syracuse. C'était démontrer, par le fait, la possibilité de l'invention d'Archimède et de l'acte patriotique attribué au plus grand géomètre de l'antiquité. Mais Buffon avait été devancé, sans le savoir, par le P. Kircher, et, plus anciennement encore, par Anthémius, architecte de Sainte-Sophie, qui doit être considéré comme le véritable inventeur des miroirs plans articulés.

Bernière fit construire en 1757 un miroir concave de verre étamé, de 1^m,16 d'ouverture, au foyer duquel l'argent et même le fer fondaient en quelques secondes; les cailloux se ramol-

lissaient et coulaient comme du verre. (Daguin, *Traité de physique.*)

Voici maintenant quelques détails sur les effets calorifiques dus à la réfraction au travers d'une lentille convergente, c'est-à-dire à ce qu'on a nommé un *verre ardent*. Les mêmes physiciens qui firent des expériences à l'aide des miroirs en firent également avec des lentilles de grandes dimensions. « Le verre le plus considérable de cette sorte, dit Dalembert dans l'*Encyclopédie*, était celui de M. Tschirnhausen : la largeur de la lentille était de 3 à 4 piés; le foyer était éloigné de 12 piés, et il avait 1 pouce et demi de diamètre; de plus, afin de rendre le foyer plus vif, on rassemblait les rayons une seconde fois par une seconde lentille parallèle à la première, qui était placée dans l'endroit où le diamètre du cône des rayons formés par la première lentille était égal à la largeur de la seconde, de sorte qu'elle les recevait tous. » Les effets furent semblables à ceux du miroir ardent du même expérimentateur.

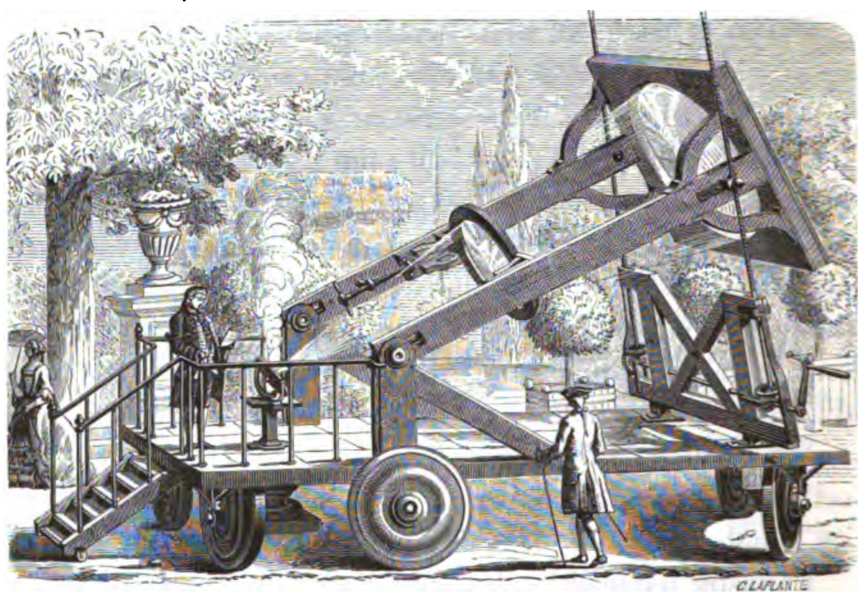


FIG. 239. — Verre ardent de Bernière.

Une des plus curieuses expériences qui aient été faites sur

la réfraction de la chaleur est celle de Mariotte, qui fit une lentille convexe avec un morceau de glace obtenu par la congélation d'eau bien pure et purgée d'air. Avec ce verre ardent d'un nouveau genre, Mariotte alluma de la poudre fine.

Il faut citer enfin le verre ardent de Bernière, construit sur le principe de celui de Tschirnhausen, et dont la figure 239 donne la disposition. Le mécanisme qu'on y voit représenté avait



FIG. 240. — Verre ardent formé d'une lentille à échelons.

pour objet de permettre à un seul homme de diriger l'ensemble des deux lentilles, de façon que les rayons solaires pussent converger toujours au même point.

Les verres ardents avaient un inconvénient qui les rendait inférieurs aux miroirs : c'est qu'en traversant des lentilles épaisses, la masse du verre absorbait une partie des rayons de chaleur. C'est à quoi Buffon chercha à remédier en imaginant les lentilles à échelons, qui consistent en un assemblage de couronnes dont chacune fait partie d'une lentille ayant une distance

focale constante, mais ayant une moindre épaisseur dans les parties centrales. Nous avons déjà décrit ces appareils, qui ont été perfectionnés par Fresnel pour l'éclairage des phares.

On a appliqué les verres et miroirs ardents à une question intéressante d'astronomie physique, celle de savoir si les rayons solaires parvenus jusqu'à nous, après leur réflexion à la surface de la lune, possèdent encore une chaleur appréciable. Un grand nombre d'observateurs, depuis Lahire et Tschirnhausen, jusqu'à Forbes et Tyndall, n'ont pu rien constater. Mais Melloni, en 1846, et depuis Piazzi Smith, lord Rosse, Marié Davy, ont reconnu un effet calorifique sensible.

§ II — Pendules compensateurs

Nous avons vu, dans le chapitre des *Applications de la pesanteur* qui traite du pendule, qu'une des conditions essentielles de l'emploi du pendule dans les horloges est l'invariabilité de longueur de la tige, ou, si l'on veut, de la distance du point de suspension au centre d'oscillation.

Or, cette invariabilité suppose que la température à laquelle le pendule a été une fois réglé, reste elle-même constante. Car, si elle augmente, la matière dont il est formé se dilate, le pendule s'allonge et ses oscillations croissent en durée. Si, au contraire, cette température s'abaisse, la matière se contracte, le pendule se raccourcit et les oscillations deviennent plus rapides. Il résulte de là qu'une horloge, bien réglée pour une température moyenne, doit *retarder* en été et *avancer* en hiver.

Comment remédier à ce défaut? Comment l'atténuer, du moins de façon à assurer l'invariabilité de longueur du pendule et l'isochronisme de ses oscillations? On y est parvenu en utilisant l'inégalité de dilatation des divers métaux, et en compensant l'accroissement de longueur du pendule qui fait baisser le centre d'oscillation par l'élévation de ce même centre. De là le nom

de *pendules compensateurs* donné aux diverses combinaisons imaginées.

Un des plus usités est le *pendule à cadre* ou *à gril* inventé par Harrison. La tige est formée par une série de verges alternativement de laiton et d'acier réunies par des traverses, de telle



FIG. 241. — Pendule compensateur à gril.



FIG. 242. — Compensateur Leroy.

façon que les allongements produits par la dilatation dans toutes les verges d'acier tendent à abaisser le centre du pendule, tandis que ceux qui affectent les verges de laiton, se faisant de bas en haut, tendent au contraire à le relever. La tige du milieu, qui est ici d'acier, est celle qui soutient la lentille du pendule; elle passe par des ouvertures pratiquées dans les traverses, de

manière à en rester indépendante. La tige de suspension est au contraire fixée à la traverse supérieure du cadre qui enveloppe les autres. Les longueurs de ces couples de verges doivent être calculées d'après les coefficients de dilatation de l'acier et du laiton, de sorte que la somme des dilatations des couples d'acier soit précisément égale à la somme des dilatations des couples de laiton.

Cela ne donne qu'une compensation approchée, parce que le centre d'oscillation d'un pendule composé ne se confond, ni avec le centre de gravité de la lentille, ni avec celui de tout l'appareil. Il y a donc encore à régler cette compensation, ce qui se fait par tâtonnement à l'aide d'une vis placée au-dessous de la lentille.

Le *pendule compensateur de Leroy* (fig. 242) consiste en un tube de laiton supporté par une traverse fixe au-dessus d'une ouverture en biseau, qui laisse passer une tige d'acier suspendue au fond du tube. Cette tige est composée de deux parties réunies par une lame d'acier flexible à la hauteur de la fente. La distance de cette fente au centre d'oscillation donne la longueur du pendule, puisque c'est là qu'est le véritable point de suspension.

En se dilatant, le tube de laiton remonte et le centre d'oscillation du pendule suit ce mouvement. Au contraire, la tige tend à l'abaisser, et l'on conçoit qu'on ait calculé les dimensions respectives des parties de l'appareil, de façon qu'il y ait compensation. On rend d'ailleurs cette compensation plus complète par le moyen adopté pour le pendule à gril et pour tous les autres systèmes compensateurs.

Nous citerons encore deux autres systèmes : le *compensateur Brocot*, que représente la figure 244, et le *compensateur de Graham* (fig. 243), qui est le premier système adopté pour la compensation des pendules.

Dans le premier de ces compensateurs, la tige de fer *f* qui supporte la lentille est munie, à la partie supérieure, d'une traverse à laquelle sont liées deux verges de laiton *c*, *c*, qui se

dilatent librement par leurs bouts inférieurs appuyés eux-mêmes sur deux leviers a,a, fixés à la lentille. Ces leviers agissent sur celle-ci à l'aide des pivots t,t, et la relèvent, de sorte que le centre d'oscillation tend à monter en même temps que la dila-



Fig. 243. — Compensateur Graham.



Fig. 244. — Compensateur Brocot.

tation de la tige de suspension tend à l'abaisser. La compensation se trouve ainsi en partie effectuée; il ne reste plus qu'à la compléter par tâtonnement.

Le compensateur de Graham est formé d'une tige de fer qui supporte, à sa partie inférieure, une plaque sur laquelle reposent deux cylindres de cristal en partie remplis de mercure. Tandis que la dilatation donne lieu à un allongement de la tige de suspension, et abaisse en conséquence le centre d'oscillation

du pendule, celui-ci se trouve relevé par l'exhaussement du niveau du mercure dans les tubes provenant de la même élévation de température.

On emploie à volonté un ou deux tubes; mais, dans tous les cas, on calcule de la même manière la hauteur qu'il faut donner au mercure pour compenser la dilatation de la tige de fer, en tenant compte à la fois de la dilatation du mercure et de celle du verre. Graham, au lieu d'une tige de fer, suspendait son pendule à l'aide d'une tige de verre, mais le principe et le calcul restaient semblables.

Pour rendre la compensation plus rigoureuse, on ôte ou l'on remet, selon les indications de l'expérience, une certaine quantité de mercure, ou bien encore on relève ou l'on abaisse le pendule par le moyen d'une vis fixée à sa partie inférieure.

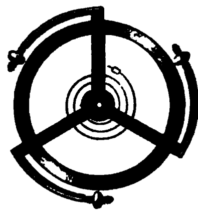


Fig. 245. — Compensateur des chronomètres.

Il existe encore d'autres systèmes de compensation des pendules, mais ils sont basés toujours sur le même principe, c'est-à-dire sur l'inégalité de dilatation des solides ou liquides qui les composent, et sur une disposition qui relève d'un côté, et abaisse de l'autre, le centre d'oscillation.

L'effet des variations de la température sur les balanciers des chronomètres est analogue à celui qu'elles produisent sur les pendules. Ces régulateurs consistent en une roue évidée (fig. 245) qui est mise en mouvement par l'action d'un ressort dit *ressort spiral*. Il en résulte des oscillations qui doivent rester parfaitement isochrones; mais comme la durée de ces oscillations dépend du rayon du balancier, de sa masse et de la force du ressort, il arrive que la dilatation provoquée par l'augmentation de température accroît ce rayon, et, par suite, la durée de l'oscillation : le chronomètre retarde donc. Il avance quand, au contraire, la température est au-dessous du point pour lequel il a été réglé. A l'aide de lames fixées sur le contour de la roue, et portant de petites masses métalliques, la compensation

peut s'effectuer : car les lames, en se dilatant, prennent une plus forte courbure ; les masses se rapprochent du centre, ce qui contre-balance l'effet de l'accroissement de rayon.

§ III — La Distillation

Il y a deux phases dans l'opération à laquelle on donne le nom de *distillation*, laquelle a pour objet de séparer un liquide des matières étrangères qui s'y trouvent en dissolution, ou d'un autre liquide avec lequel il se trouve mélangé.

La première phase consiste à réduire le liquide à l'état de vapeur par l'ébullition. S'il contenait des substances étrangères en dissolution, des sels, par exemple, comme il en existe dans la plupart des eaux naturelles : eaux de source, de rivière, eau de mer, la partie aqueuse se vaporise seule; les substances étrangères restent au fond du vase : la séparation est effectuée. S'il est mélangé avec un liquide d'une autre nature, l'ébullition les sépare encore, au moins en partie, puisque la température d'ébullition de liquides différents n'est pas la même, et qu'alors un des liquides se réduit en vapeur avant l'autre.

Comme le but qu'on se propose dans les deux cas est d'obtenir avec plus ou moins de pureté le liquide en question, il faut, après l'avoir réduit en vapeur, le faire changer d'état ou le ramener à son état primitif. C'est l'objet de la seconde phase de la distillation, et l'on y parvient aisément en condensant par le refroidissement la vapeur produite.

La distillation est une opération industrielle très-anciennement connue, qui se fait au moyen d'un appareil nommé *alambic*.

C'est une chaudière *a*, nommée *cucurbite*, surmontée d'une cornue *bc* à laquelle on donne le nom de *chapiteau*. Placée sur un foyer et remplie de l'eau à distiller, elle communique en *d* avec la partie de l'appareil qu'on appelle *serpentin*, à cause

de sa forme contournée en hélice. La vapeur qui se forme par ébullition au-dessus de l'eau de la cucurbite, se rend dans le serpentin et s'y condense par son contact avec les parois, sans cesse refroidies, d'une caisse où le serpentin plonge. L'*eau distillée* est reçue au dehors de la caisse dans un vase *g*. La condensation incessante de la vapeur ne peut se faire que par l'échange de la chaleur de vaporisation et l'élévation de température de l'eau de la caisse *e*. Il importe donc qu'on renouvelle l'eau froide à mesure que la distillation s'effectue : c'est ce qu'on

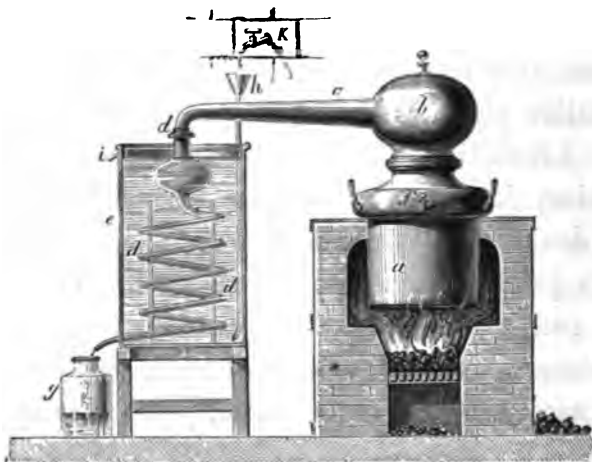


Fig. 246. — Alambic, appareil de distillation.

obtient par le robinet *k*, qui amène de l'eau froide au fond de la caisse par l'entonnoir et le tube *hd*, pendant que l'eau échauffée s'écoule à la partie supérieure par l'ajutage *i*.

L'alambic est employé sur les navires pour distiller l'eau de mer, et peut, dans une certaine mesure, procurer l'eau douce nécessaire aux besoins des équipages. L'eau ainsi distillée revient environ à un centime le litre.

L'appareil distillatoire est plus compliqué quand on a affaire à un mélange de liquides inégalement volatils, comme sont les liquides alcooliques. Avec l'alambic ordinaire et plusieurs distillations successives, on obtiendrait bien à un certain degré de pureté le liquide concentré qu'on a en vue; mais ce liquide,

l'alcool, par exemple, conserve alors un goût empyreumatique qu'il importe de détruire.

On y parvient avec un appareil tel que celui dont la figure 247 représente l'ensemble, et que nous allons succinctement décrire.

A est la chaudière directement chauffée par le foyer; B est une autre chaudière chauffée par les gaz perdus de la combustion, dont la chaleur se trouve ainsi utilisée. Deux réfrigérants R, R′, renferment des serpentins où se fait la condensation de

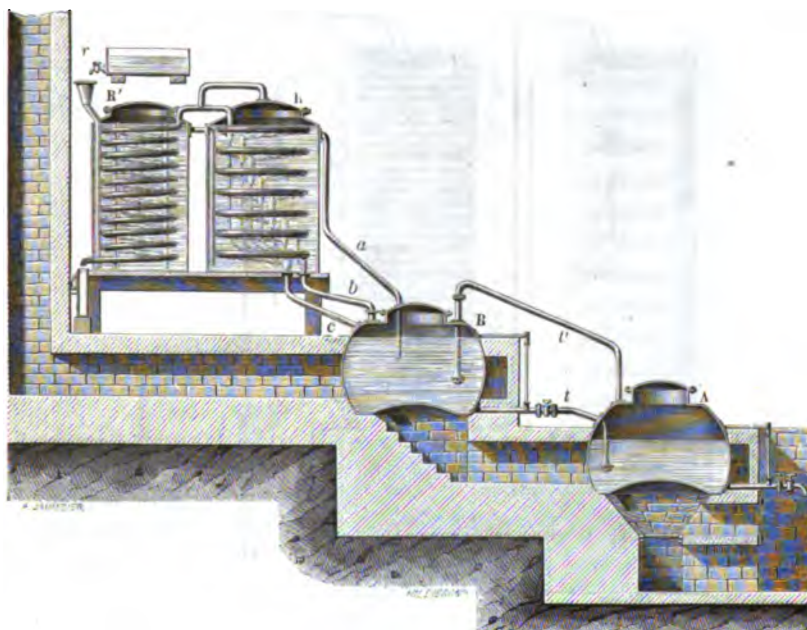


FIG. 247. — Appareil Laugier: distillation de l'alcool.

la vapeur du liquide à distiller. C'est ce liquide, le vin, par exemple, qui remplit toutes les parties de l'appareil, chaudières et réfrigérants. Il est introduit d'abord dans le réfrigérant R′, s'écoule par un tuyau de trop-plein dans R, de là par le tuyau *a* dans la chaudière B et par le tuyau *t* dans la chaudière A. La vapeur suit une marche précisément inverse. De A elle se rend par *t′* dans la chaudière B; de celle-ci, par *b*, elle passe dans R, où elle se condense en partie dans une série de tronçons d'hélice. Le liquide condensé revient en B par le tube de

retour *c* commun aux hélices; la partie non condensée de la vapeur passe au serpentin de R′ et s'y condense à son tour.

Voici comment se fait la mise en train. Quand le liquide a atteint dans la chaudière B le niveau de la pomme d'arrosoir, on suspend l'écoulement, on emplit la chaudière A aux trois quarts, et l'on chauffe. Alors, pendant que la partie la plus alcoolique s'écoule par le serpentin, la partie la plus aqueuse

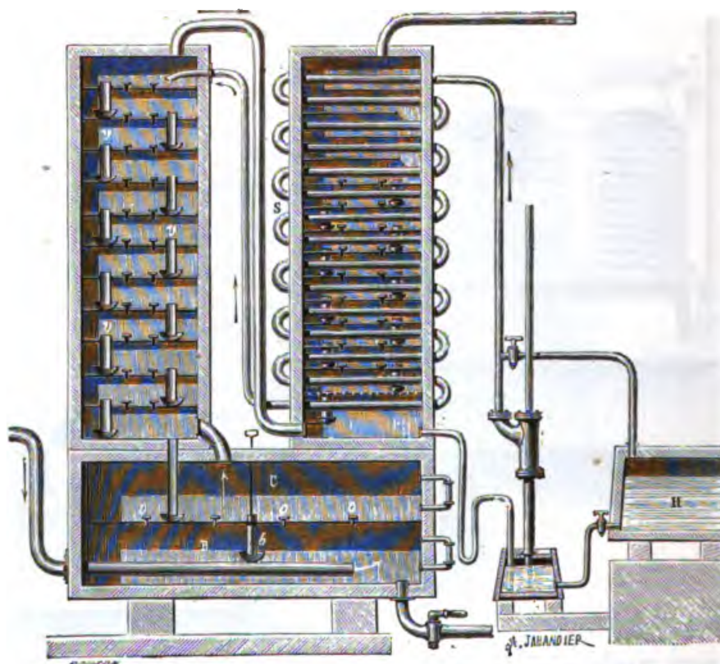


FIG. 248. — Appareil Coffey pour la distillation de l'alcool.

revient en B, dont le niveau s'accroît, tandis que celui de A baisse. Quand ce dernier est réduit au quart, on évacue par le robinet de vidange le résidu ou *vinasse*. On ouvre le robinet *t*, et A s'emplit aux dépens de B; après quoi on reprend l'écoulement en *r*, sans désormais l'interrompre, jusqu'à ce que de nouveau B, qui reçoit du liquide de trois sources, se soit rempli et que A se soit réduit comme auparavant. On recommence ensuite l'opération indéfiniment.

La distillation du vin, celle de toutes les liqueurs fermentées tirées des céréales : froment, seigle, orge germée, maïs, des pommes de terre, des betteraves, etc., a pris une immense extension dans tous les pays d'Europe ou d'Amérique. C'est l'opération terminale d'une industrie considérable, la fabrication de l'alcool. Les appareils distillatoires sont très-variés. En France, outre l'appareil Laugier, qu'on vient de voir, on emploie ceux de Cail, de Champonnois; en Allemagne, ceux de Dorn, de Pistorius, de Gall; en Angleterre, enfin, celui de Coffey [1], que représente la figure 248. Nous renvoyons au *Dictionnaire de chimie* de Wurtz pour la description de ces appareils, dont il suffisait ici de faire connaître le principe physique.

§ IV — Évaporation — Salines — Alcarrazas — Fabrication de la glace au Bengale

Une grande partie du sel (chlorure de sodium) nécessaire à la consommation provient des eaux de la mer, où il entre dans la proportion de $\frac{1}{40}$ ou $\frac{1}{37}$ environ. C'est par évaporation à air libre, dans de larges bassins peu profonds, qu'on arrive à concentrer peu à peu l'eau marine, et le sel se dépose au fond des bassins sous forme de cristaux, et à la surface de l'eau en une couche mince solide. L'évaporation est activée par l'élévation de température due aux rayons solaires et par le vent. Aussi est-ce dans la saison chaude que l'on récolte le sel dans les marais salants, et qu'on exécute la série de manipulations très-simples qui constituent cette industrie. Le sel est ramassé en

1. « Pour donner une idée des dimensions d'un appareil de Coffey, nous n'avons qu'à mentionner que MM. Currie, à Bow, près de Londres, y obtiennent annuellement plus de 4 675 000 litres d'alcool à 65 degrés (*overproof*) par la distillation du moût fermenté d'orge et d'avoine avec addition de malt. Cette seule maison paye à l'État plus de 400 000 livres sterling (11 millions de francs) de droits par an. »
(*Dict. de chimie*, art. Alcools.)

tas qu'on laisse exposés à l'air un certain temps, pour permettre aux substances déliquescentes qui s'y trouvent mélangées de se dissoudre : le sel ainsi égoutté est ensuite livré au commerce.

On obtient encore le sel en l'extrayant par évaporation des eaux des sources salines; mais, comme ces eaux renferment d'ordinaire une faible proportion de sel, on commence par les



FIG. 249. — Marais salants de l'Ouest.

concentrer en leur faisant subir une première évaporation à air libre, après quoi on achève l'opération en soumettant les eaux concentrées à l'action de la chaleur. Le sel se dépose dans les chaudières où s'effectue cette seconde opération.

L'évaporation à air libre des eaux salines se fait de la façon suivante. Des tas de fagots sont empilés et maintenus par une charpente au-dessus du bassin où l'on veut recevoir les eaux; celles-ci s'échappent, par une série d'ajutages *a,a...*, de deux auges AB, CD, situées à la partie supérieure de cette construction, à laquelle on donne le nom de *bâtiment de graduation*, et

qu'on oriente de manière que sa direction longitudinale soit perpendiculaire à celle du vent le plus fréquent. L'eau s'écoule ainsi en se disséminant à travers les branches et les petits rameaux des fagots, de sorte qu'elle est forcée de présenter une grande surface à l'air libre ; l'évaporation s'effectue donc avec

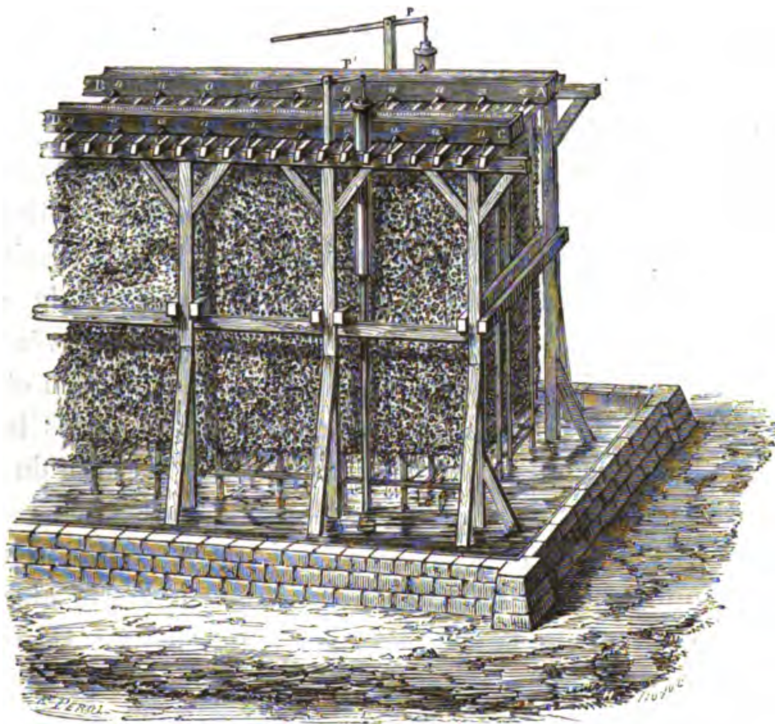


FIG. 250. — Bâtiment de graduation pour l'évaporation des eaux salines.

une grande rapidité, et l'eau du bassin est plus concentrée que celle des sources. On la ramène une seconde, une troisième fois à l'aide de pompes P, P′, jusqu'à ce que le degré de concentration soit suffisant, et l'on achève l'évaporation dans les chaudières.

Tout le monde connaît ces vases de terre poreuse auxquels on donne le nom d'*alcarrazas*[1], et qui servent à tenir l'eau

1 Mot espagnol, *alcarraza*, tiré lui-même de l'arabe *al quraz*, cruche.

fraîche en été. La propriété qu'on recherche en ces sortes de carafes est due au froid qui résulte de l'évaporation du liquide à la surface extérieure. L'eau qui pénètre à travers les parois, et qui s'évapore d'autant plus rapidement que l'air extérieur, plus chaud, est moins saturé de vapeur, est successivement remplacée par de l'eau nouvelle. L'abaissement de température qui résulte de cette évaporation empêche l'eau de l'alcarraza de s'échauffer, comme il arriverait si les parois du vase étaient imperméables.

C'est cette évaporation, si abondante et si rapide par les nuits claires, qui donne lieu à la formation de la rosée, condensation de la vapeur d'eau de l'air en petites gouttelettes à la surface des corps terrestres. Quand le froid qui en résulte est assez intense, les gouttes se gèlent et produisent la gelée blanche. Au Bengale, où la température est trop élevée pour qu'il se forme jamais naturellement de la glace, on en obtient artificiellement de la façon suivante. Voici en quels termes Tyndall rend compte du procédé usité, et de la cause du phénomène physique dont ce procédé est une application :

« Wells (auteur de la *Théorie de la rosée*) fut le premier, dit-il, qui expliqua la production artificielle de la glace au Bengale, où elle ne se forme jamais naturellement. On creuse des fossés peu profonds que l'on remplit en partie de paille, et sur la paille on expose au ciel pur des bassins plats contenant de l'eau qu'on a fait bouillir. L'eau a un grand pouvoir de radiation; elle envoie en abondance sa chaleur dans l'espace, et la chaleur ainsi perdue ne peut pas être remplacée par la chaleur de la terre, que la paille, non conductrice, arrête au passage. Le soleil n'est pas levé, que déjà de la glace s'est formée dans chaque vase. Telle est l'explication de Wells, et c'est sans aucun doute l'explication véritable. Je pense, toutefois, qu'elle a besoin d'un complément. Il paraît, d'après les descriptions venues jusqu'à nous, que la condition la plus propice à la formation de la glace n'est pas seulement un ciel pur, mais aussi une atmosphère sèche. Les nuits, dit sir Robert Baker, les plus

favorables à la production de la glace sont celles qui sont les plus claires et les plus sereines, et pendant lesquelles *il apparaît très-peu de rosée après minuit.* J'ai écrit en italique cette phrase très-significative. Pour produire de la glace en abondance, l'atmosphère ne doit pas seulement être claire, elle doit en outre être comparativement privée de vapeur d'eau. Quand la paille sur laquelle reposaient les bassins devenait humide, on la remplaçait par de la paille sèche; et la raison que Wells assignait à cette pratique, c'est que la paille, mouillée et devenue plus compacte, agissait comme corps conducteur. Cela peut être; mais il est certain aussi que la vapeur d'eau, en s'élevant de la paille humide et en se répandant au-dessus des bassins, serait devenue un écran qui aurait arrêté le refroidissement par rayonnement et retardé la congélation. »

§ V — Fabrication artificielle de la glace

La glace est d'un usage aujourd'hui très-répandu dans les nations civilisées; on s'en sert, non-seulement pour rafraîchir, en été, les boissons de toute sorte, pour fabriquer les sorbets, les crèmes, mais aussi en médecine et en chirurgie pour le traitement de certaines maladies ou le pansement des plaies. Aussi la consommation en est-elle considérable en Europe et en Amérique. On la recueille en blocs en Russie, en Suède et en Norvége, au Canada à la surface des lacs, et des navires la transportent partout dans les pays méridionaux. Pour transporter ces blocs sans que la température plus clémente des lieux de destination les fonde, on les empile dans des caisses par couches qu'on entoure et qu'on sépare avec de la sciure de bois : la faible conductibilité de cette matière suffit pour protéger la glace pendant son voyage. A son arrivée, on la recueille dans des glacières, d'où elle est extraite ensuite au fur et à mesure des besoins.

Mais on a cherché à la fabriquer sur place et au moment même où l'on veut l'employer. Les appareils imaginés pour cet objet sont fondés sur le même principe que nous venons de voir appliqué déjà, celui du froid par une évaporation rapide.

Une chaudière cylindrique, remplie en partie d'une dissolution de gaz ammoniac, est placée sur un fourneau jusqu'à ce que la température de 130° soit atteinte, ce qu'on reconnaît à l'aide d'un thermomètre dont la tige dépasse le couvercle. Le gaz ammoniac se dégage et se rend, par un tube abducteur, dans un réfrigérant ou vase en forme de tronc de cône



FIG. 251. — Appareil Carré pour la fabrication artificielle de la glace.

renversé plongé dans une cuve d'eau froide. A l'intérieur de ce réfrigérant, on a placé le vase cylindrique contenant l'eau qu'il s'agit de congeler. Or, voici comment ce résultat s'obtient. Les vapeurs ammoniacales qui se dégagent incessamment de la chaudière sont refroidies par l'eau de la cuve, et, en outre, soumises à une pression croissante : elles se condensent, le gaz se liquéfie et reste renfermé dans des godets adaptés aux parois dans l'espace annulaire qui entoure le cylindre central. A ce moment, on remplace le fourneau par une cuve d'eau froide; l'eau de la chaudière redevient, par le refroidissement, apte à dissoudre le gaz ammoniac qui reprend rapidement l'état gazeux. Cette évaporation nécessite une absorption de chaleur

qui se fait aux dépens du vase central et de l'eau qu'il contient. On peut bientôt en retirer un bloc de glace.

L'appareil que nous venons de décrire, qui est représenté dans la figure 251, est destiné à l'usage domestique, à cause de la faible quantité de glace qu'il peut produire. Nous ne ferons que mentionner les grands appareils construits par le même inventeur pour la fabrication industrielle de la glace.

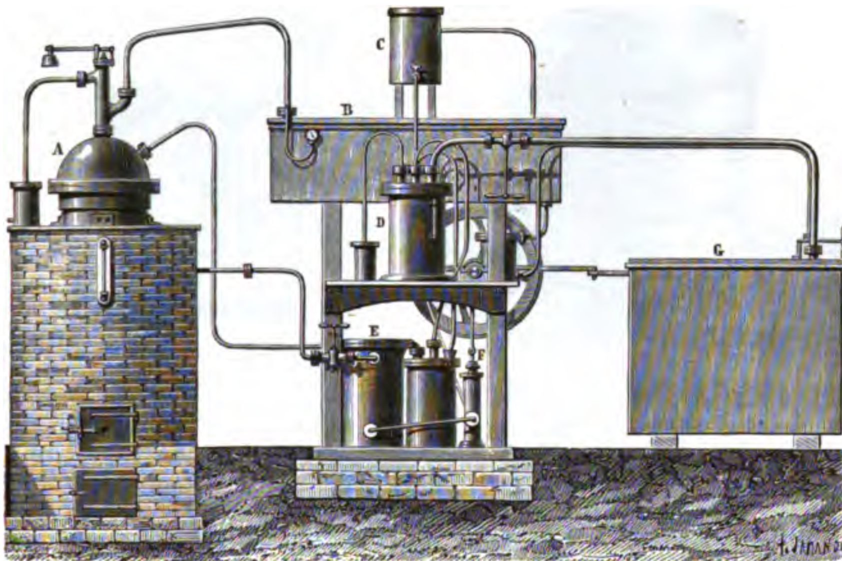


Fig. 252. — Grand appareil Carré pour la fabrication artificielle de la glace]

A est la chaudière où l'on chauffe la dissolution ammoniacale. Le gaz qui s'en échappe se rend dans un récipient B, où il se liquéfie par refroidissement; C est un réservoir d'où coule constamment un jet d'eau froide destiné à renouveler l'eau du récipient. Le gaz liquéfié va remplir les parois creuses du réfrigérant G, où se trouvent disposés les vases remplis de l'eau à congeler. L'eau de la chaudière, dépouillée du gaz en dissolution et refroidie, pénètre alors dans un vase E, qui est lui-même en communication avec D et avec le réfrigérant. Le liquide ammoniacal reprend l'état gazeux pour se dissoudre à nouveau dans l'eau du vase E, et c'est par le fait du refroidissement causé

par cette évaporation que l'eau se congèle dans les vases placés au sein du réfrigérant. Enfin, l'eau régénérée est, à l'aide d'une pompe F, refoulée dans la chaudière, de sorte que la fabri-



Fig. 253. — Sorbetière.

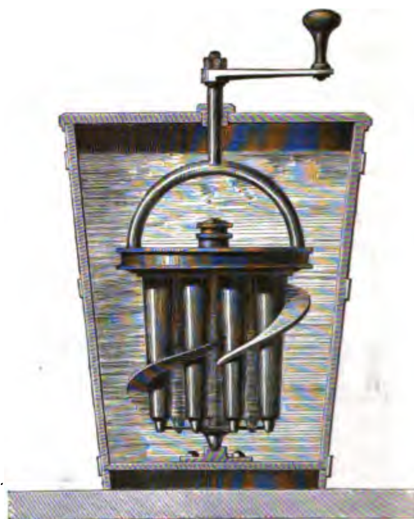


Fig. 254. — Glacière Goubaud.

cation de la glace se fait d'une façon pour ainsi dire continue.

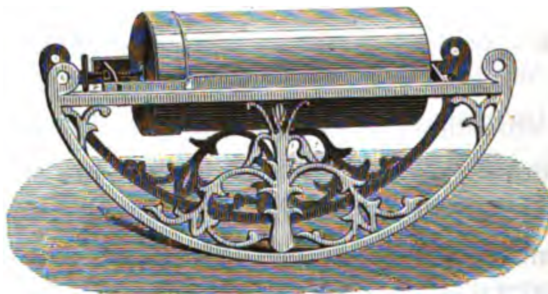


Fig. 255. — Glacière à bascule.

Nous donnerons encore quelques détails sur la fabrication artificielle de la glace basée sur le refroidissement qui résulte, non plus de l'évaporation brusque d'un liquide, mais de la dissolution de certaines substances. La cause est encore un

changement d'état; mais ici il s'agit d'une liquéfaction d'un genre particulier, qui nécessite un travail moléculaire, et, par suite, absorbe une quantité de chaleur plus ou moins considérable. L'ensemble des corps ainsi mélangés pour produire du froid se nomme un *mélange réfrigérant*. Voici quelques-uns des mélanges réfrigérants les plus employés:



Fig. 256. — Glacière des familles.

Deux parties de neige ou de glace pilée, avec *une* partie de sel marin, donnent un froid qui peut atteindre 21° au-dessous de zéro.

Cinq de chlorhydrate d'ammoniaque, *cinq* de nitrate de potasse, *huit* de sulfate de soude et *seize* d'eau, permettent de produire un froid de 15°.

Une partie d'azotate d'ammoniaque et *une* d'eau donnent un maximum d'effet de 15°.

Enfin, *trois* de neige et *quatre* de chlorure de calcium hydraté donnent un froid de 48°.

Voici maintenant quelques appareils basés sur cette action.

Un mélange de glace pilée et de sel contenu dans un seau où l'on plonge l'ustensile renfermant les sirops, jus ou crèmes à congeler, ou, selon l'expression technique, à transformer en sorbets, constitue le plus simple de ces appareils : c'est la *sorbetière* (fig. 253).

Les figures 254, 255 et 256 représentent des *glacières domestiques* toutes construites et basées sur ce principe : froid produit par la dissolution, qu'on active, soit par un mouvement de bascule, soit par un mouvement de rotation imprimé au liquide réfrigérant à l'aide d'une manivelle, par des palettes en hélice entourant le vase qui contient l'eau ou le sirop à congeler. Dans la *glacière des familles*, l'eau de fusion de la glace s'écoule par la partie inférieure et asperge des bouteilles de vin, qui se trouvent ainsi refroidies, et, comme le disent les gourmets, *frappées à la glace*.

CHAPITRE V

LA MACHINE A VAPEUR

§ I — La Vapeur force motrice

Les anciens connaissaient la force élastique de la vapeur d'eau. Sans avoir de notions nettes, précises, de ses propriétés physiques, ils avaient cherché à tirer parti de cette force.

C'est ainsi que Héron d'Alexandrie inventa la machine à laquelle on a donné le nom d'*éolipyle*, et divers appareils où l'action de l'air comprimé ou dilaté était en jeu. On va voir, en effet, que le mouvement de l'éolipyle avait bien pour cause la force expansive de la vapeur, mais agissant d'une tout autre façon que dans les machines à vapeur modernes.

C'était une marmite ou chaudière en partie pleine d'eau, placée sur un foyer et fermée par un couvercle. Sur celui-ci, un tube creux et recourbé, muni d'un robinet, allait soutenir, en la pénétrant, une sphère creuse métallique, qu'un autre montant égal soutenait extérieurement à l'extrémité du même diamètre. La sphère était donc mobile autour de ce diamètre ou axe. Deux autres tubes creux et recourbés partaient de la surface de la sphère aux extrémités d'un diamètre perpendiculaire à l'axe. Cela posé, on va comprendre l'action motrice de la vapeur

dans ce petit appareil. On ouvre le robinet; la vapeur monte de la chaudière dans le tube creux et emplit la sphère métallique. Si celle-ci n'était percée d'aucune ouverture, elle resterait immobile; mais la vapeur, qui tend à presser la surface intérieure de la sphère avec la même force en tous ses points, trouvant deux issues, s'échappe avec bruit en se condensant dans l'air; la réaction, qui lui aurait fait équilibre au cas de la fermeture complète, s'exerce donc en sens contraire, et la sphère tourne avec plus ou moins de rapidité dans un sens opposé à celui de la sortie de la vapeur.



FIG. 257. — Éolipyle de Héron d'Alexandrie.



FIG. 258. — Appareil de Salomon de Caus.

L'*éolipyle* (nom qui signifie *porte d'Éole* ou *porte de l'air*) est, comme on voit, une machine où la force élastique de la vapeur agit par réaction. Ce n'a jamais été d'ailleurs qu'un jeu de physique amusante, bien qu'il ait fixé l'attention des savants et des expérimentateurs des siècles qui ont précédé Papin, et qu'on l'ait décrit en proposant de l'utiliser pour faire marcher des tournebroches.

L'appareil décrit par Salomon de Caus dans son opuscule : *Les raisons des forces mouvantes* (1605), est un exemple d'une application plus directe de la force expansive de la vapeur. De l'eau est introduite par le robinet D dans la sphère creuse A,

qu'on place sur le feu après avoir fermé le robinet d'introduction. Un tube BC passe par une autre ouverture B et descend dans l'eau sans toucher le fond. Quand la vapeur s'est formée en assez grande quantité et que sa tension est assez forte, on ouvre le robinet B, et l'eau, pressée à sa surface intérieure par la force élastique de la vapeur, est projetée au dehors par le tube.

Le récit complet et détaillé de toutes ces tentatives, de ces ébauches mécaniques où l'on cherchait à utiliser diverses forces naturelles, celles de l'air dilaté ou comprimé et celle de la vapeur, a un intérêt qui n'est point douteux pour l'histoire des progrès des applications de la science humaine. Mais tout cela ne devient sérieusement instructif qu'à l'époque où la physique, sortant de la phase des explications subtiles et inféconbes, est entrée dans la voie de l'expérience sous l'impulsion des Galilée, des Boyle, des Huygens. La machine à vapeur ne pouvait naître, ne pouvait recevoir les perfectionnements qui en firent un véritable moteur industriel, que dans le siècle qui avait vu découvrir les propriétés de l'air, la machine pneumatique, le baromètre et le thermomètre : Papin et Watt sont les enfants de Torricelli et de Galilée. La machine à vapeur est la fille de ces deux inventions si simples et si fécondes : celle du *baromètre*, qui démontre et mesure la pression de l'atmosphère, qui compare à cette pression les forces élastiques des gaz et des vapeurs; celle du *thermomètre*, qui mesure les degrés de la chaleur. Le moyen de faire le vide, soit dans la chambre barométrique, soit dans un récipient dont l'air est extrait par une pompe, invention si précieuse d'Otto de Guéricke, venait aussi d'être trouvé, quand Denis Papin, notre illustre compatriote, a jeté les fondements de la plus grande révolution industrielle qu'ait vue le monde.

Mais, pour bien préciser par quelle suite d'idées ont dû passer les grands esprits qui ont eu la gloire d'attacher leurs noms à la découverte de la machine à vapeur, il est indispensable d'entrer dans quelques développements.

§ II — Papin — Premiers essais

Dès 1680, Huygens avait songé à utiliser la force expansive de la poudre à canon. Voici comment. Dans un cylindre muni d'un piston mobile, il faisait détoner une certaine quantité de poudre, et la violente expansion des gaz chassait l'air contenu dans le cylindre par deux ouvertures disposées de manière à se refermer aussitôt. Le vide se faisait donc, au moins partiellement, de sorte que la pression de l'atmosphère s'exerçait sur la face supérieure du piston avec une énergie proportionnelle à sa surface et en rapport avec le degré de vide obtenu.

Un modeste médecin français, Denis Papin, que la révocation de l'édit de Nantes força de s'exiler, chercha d'abord[1] à perfectionner la machine proposée par Huygens, machine qui, du reste, dans la pensée de son auteur, « pouvait servir, non-seulement à élever toutes sortes de grands poids et des eaux pour les fontaines, mais aussi à jeter des boulets et des flèches avec beaucoup de force, suivant la manière des balistes des anciens ». Mais bientôt, deux années plus tard, en 1690, il songea à substituer à la poudre à canon un autre agent, propre comme elle à faire le vide sous le piston et à laisser ainsi à la pression atmosphérique toute sa prépondérance.

Cet agent, c'était la vapeur d'eau, avec laquelle Papin était déjà familier, puisque dès 1681 il avait inventé sa marmite célèbre, son *nouveau digesteur*, dont il sera question plus loin. Voici en quelques lignes la description de la première machine à vapeur telle que Papin l'avait conçue, et l'explication, très-simple à concevoir, de ses effets.

B est un piston muni d'une tige verticale D et mobile dans un cylindre de même diamètre, à l'intérieur duquel on a intro-

1. C'est à l'année 1688 que remonte cette première tentative.

duit de l'eau à une faible hauteur. Dans le piston, on a pratiqué un trou L qu'une tige M peut fermer à volonté.

Supposons le piston enfoncé dans le cylindre jusqu'au contact de l'eau dont une partie a pu sortir par l'ouverture, celle-ci étant alors fermée à l'aide de la tige. Plaçons alors le cylindre, dont les parois sont métalliques, sur un foyer ardent : l'eau est bientôt réduite en vapeur, et celle-ci, par sa force élastique, surmonte le poids du piston et la pression de l'atmosphère ; elle fait remonter le piston au haut du cylindre. Dès que le piston arrive au sommet de sa course, une verge mince C, mobile autour d'un de ses points, et jusque-là maintenue au contact de la tige du piston par un ressort G, pénètre dans une fente de cette tige, lorsque le mouvement d'ascension amène la fente en face de la verge. En ce moment donc, le mouvement s'arrête. Otons alors le foyer de dessous le cylindre; bientôt ses parois et la vapeur d'eau qu'elles renferment se refroidissent : la vapeur se condense et le vide reste au-dessous du cylindre, de sorte que si l'on vient à faire sortir la verge de la fente où elle maintient la tige et le piston, le piston, pressé par le poids de l'atmosphère, sera poussé de haut en bas, et l'on pourra profiter de cette pression considérable pour lui faire soulever des fardeaux.

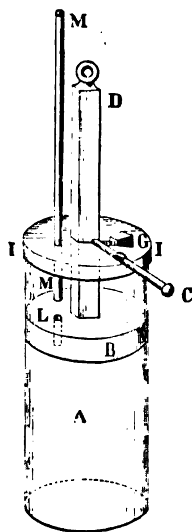


Fig. 259. — Première machine à vapeur de Papin.

En un mot, la disposition de la machine de Papin est un peu différente de celle où Huygens faisait le vide par la poudre à canon; mais l'effet produit est le même. Seulement, c'est la vapeur d'eau qui agit, c'est sa force élastique qui fait monter le piston; c'est sa condensation par le froid qui fait le vide.

Retenons ici deux faits. Papin, dans cette première machine à vapeur, emploie d'abord le fluide élastique à une pression un peu supérieure à la pression atmosphérique : elle lui sert

alors comme moteur pour soulever le piston. Puis il la condense par le refroidissement, de manière à faire le vide, et c'est la pression de l'atmosphère qui devient le moteur véritable, celui qui accomplit le travail utile en vue duquel la machine est construite. Plus tard il modifia sa conception première, mais peu heureusement, il faut le dire; et c'est la machine que nous venons de décrire qui constitue son plus grand titre de gloire, son droit incontestable à être considéré comme l'inventeur de la machine à vapeur.

Savery, qui vint après, eut l'heureuse idée de produire la vapeur dans un vase séparé, de la condenser dans un autre; mais sa machine est, sous un autre rapport, une rétrogradation relativement à celle de Papin. En effet, la force élastique de la vapeur y est employée à refouler l'eau directement, tandis que nous venons de voir Papin se servir de cette force pour produire le mouvement d'un piston, mouvement qu'il suffira de transformer par des procédés purement mécaniques, pour faire de la machine à vapeur un moteur universel. Voyons sommairement quel est le principe de la machine à vapeur moderne, et de quels organes essentiels elle est composée.

D'abord et avant tout, il faut songer à développer la force, c'est-à-dire à produire et à recueillir une certaine quantité de vapeur d'eau. C'est à quoi on parvient en faisant chauffer sur un foyer une marmite ou chaudière remplie d'eau, du moins en partie. C'est le *générateur de vapeur*, l'une des trois parties essentielles ou constitutives de la machine.

De la chaudière, la vapeur passe dans une capacité de forme cylindrique partagée en deux par un piston mobile : c'est là que, par des dispositions spéciales, la vapeur agit, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre du piston, de manière à lui imprimer un mouvement alternatif ou de va-et-vient, mouvement qui est l'objet direct de la machine.

Le cylindre, le piston et les pièces accessoires qui distribuent la vapeur dans les deux chambres du cylindre, constituent la partie de la machine formant le *mécanisme moteur* : c'est la

machine proprement dite, dont le jeu ne serait d'ailleurs pas bien compris, si je n'entrais encore dans quelques détails.

Considérons la figure 260, qui représente la machine à vapeur réduite à ses organes essentiels. C est le générateur où l'eau se transforme en vapeur, en remplissant l'espace situé au-dessus de l'eau dans la chaudière, ainsi que le tuyau VV. Ce tuyau conduit le gaz élastique dans une capacité B contiguë au cylindre, et qu'on nomme la *boîte à vapeur*. Deux robinets R, R, permettent à la vapeur, quand l'un ou l'autre est ouvert, d'arriver soit à la chambre supérieure B, soit à la chambre inférieure A du cylindre. Supposons d'abord le robinet supérieur ouvert et l'autre fermé. La vapeur passe en B, où elle presse le piston et tend à lui imprimer un mouvement descendant dans le cylindre. Qu'on ferme alors le robinet supérieur et qu'on ouvre l'autre, la vapeur passera en A, où elle agira sur le piston par sa face inférieure et tendra à le faire remonter.

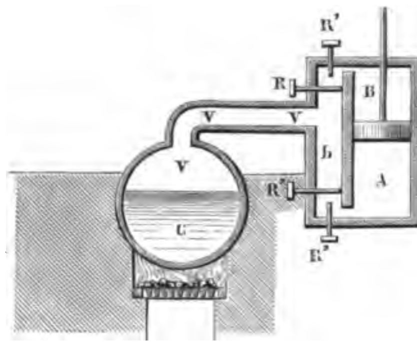


FIG. 260. — Organes essentiels de la machine à vapeur.

Mais là se présente une difficulté : si la vapeur se trouvait à la fois en A et en B, comme sa force élastique est la même des deux côtés, son action sur la face inférieure du piston compenserait exactement son action sur la face supérieure, et le mouvement ne serait pas produit.

Il fallait donc trouver le moyen d'annuler sa force élastique dès qu'elle a pu exercer son action, et cela alternativement dans les deux chambres du cylindre. On y parvient en ouvrant successivement les robinets R', R' : chacun d'eux est adapté dans une ouverture par où la vapeur est mise en communication avec un espace vide d'air, qui contient de l'eau froide, et dont les parois sont elles-mêmes à une basse température. Dès que le

fluide pénètre dans cet espace qu'on nomme le *condenseur*, elle se précipite à l'état liquide presque tout entière, et ce qui en reste n'a plus qu'une tension très-faible, de beaucoup inférieure à la tension que possède la vapeur, soit dans la chaudière, soit dans le cylindre. Cette disposition est nécessaire dans les machines où la vapeur n'agit qu'avec une tension peu supérieure à la pression atmosphérique. Quand la vapeur a une tension égale à plusieurs atmosphères, le condenseur n'est plus indispensable : la condensation se fait à l'air libre.

Il est aisé alors de voir que, dans chacun de ces cas, la difficulté signalée se trouve vaincue; car imaginons le robinet supérieur R ouvert et l'inférieur fermé, tandis que le robinet supérieur R′ est fermé et l'inférieur ouvert. La vapeur afflue en B, où elle exerce son action; celle que renfermait A se condense, et le vide se fait sous le piston, qui descend jusqu'au bas du cylindre.

A ce moment, le jeu des robinets est renversé. La vapeur de la chaudière pénètre en A; celle de B se condense, et le piston est soulevé de bas en haut. Ainsi indéfiniment.

Voilà donc, dans son principe et ses dispositions fondamentales, la machine à vapeur moderne. Un mouvement rectiligne alternatif, déterminé par l'action de la force élastique de la vapeur dans un cylindre fermé de toutes parts, action qui cesse brusquement dès que la même vapeur s'est condensée par le refroidissement. Le mouvement obtenu, il ne s'agit plus que de lui faire produire un effet utile, en le transformant de mille manières, selon les besoins de l'industrie, selon l'espèce d'application qu'on en veut faire, en lui demandant, par exemple, tantôt de la puissance, tantôt de la vitesse, tantôt la vitesse et la puissance réunies. Le mécanisme qui opère cette transformation est le troisième élément que nous aurons à étudier pour compléter la description de la machine à vapeur, qui comprend donc :

Le *générateur* ou la *chaudière*.

Le *récepteur* ou *mécanisme moteur* et le *mécanisme de distribution*.

Le *mécanisme de transmission.*
Étudions en détail chacune de ces parties de la machine.

§ III — La Chaudière ou le Générateur de vapeur

Les formes de chaudières adoptées aujourd'hui sont si nombreuses, que je ne chercherai pas même à les énumérer toutes :



Fig. 261. — Chaudière à deux bouilleurs : vue extérieure.

il sera bien suffisant, pour le but que je me propose, de faire comprendre en quoi se ressemblent et en quoi diffèrent les systèmes principaux. Mais avant d'en arriver là, faut-il encore connaître d'une façon précise un exemplaire de l'un d'entre eux. Je prendrai la chaudière la plus généralement adoptée dans les usines où l'on emploie des machines fixes, c'est-à-dire des machines construites, installées à demeure, là même où elles

fonctionnent. La figure 261 en donne l'aspect extérieur. Voyons quelles en sont les dispositions intérieures.

A la partie supérieure du bâti de maçonnerie repose un grand vase de tôle, de forme cylindrique dans toute sa longueur, terminé aux deux bouts par deux fonds hémisphériques. C'est le corps de la chaudière, la capacité qui contient la plus grande masse de l'eau à vaporiser. Les figures 262 et 263 la montrent en C, soit en coupe longitudinale, soit en coupe transversale.

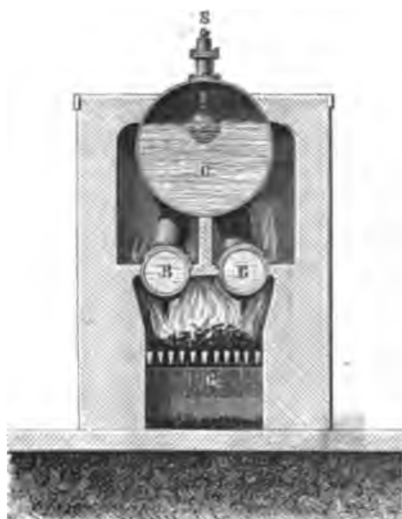


FIG. 262. — Chaudière à deux bouilleurs : coupe transversale.

Au-dessous du corps principal, on voit deux, quelquefois trois longs tubes également cylindriques, B,B, qui communiquent avec lui par des tubulures nommées *évents* ou *culottes*.

Ces *bouilleurs*, entièrement remplis d'eau, sont directement placés au-dessus du foyer, dont les flammes lèchent d'abord leur surface extérieure, et c'est évidemment dans leur sein que l'ébullition a lieu tout d'abord ou que se forment les premières bulles de vapeur. Leur nom de bouilleurs est donc bien justifié.

Les deux figures ci-jointes indiquent avec assez de clarté les positions et les dimensions du foyer, de la grille, du cendrier, pour que je n'aie pas besoin d'en parler autrement.

Quant à la cheminée, on la voit à sa base, en U, et l'on peut suivre la fumée et les gaz de la combustion, depuis leur origine, au-dessus du foyer, jusqu'à cette base, à travers les conduits ou *carneaux* *c*,*c*, qui se trouvent ménagés entre les bouilleurs, le corps principal de la chaudière et la maçonnerie qui les enveloppe.

Il faut remarquer la disposition de ces carneaux : celui qui

est au-dessous des bouilleurs force la flamme et les gaz chauds à marcher jusqu'au fond du fourneau et à échauffer directement d'abord les bouilleurs eux-mêmes. Arrivés là, les gaz montent à l'un des deux carneaux latéraux supérieurs; ils cèdent encore une partie de la chaleur qu'ils ont conservée à la paroi de la chaudière avec laquelle ils sont en contact.

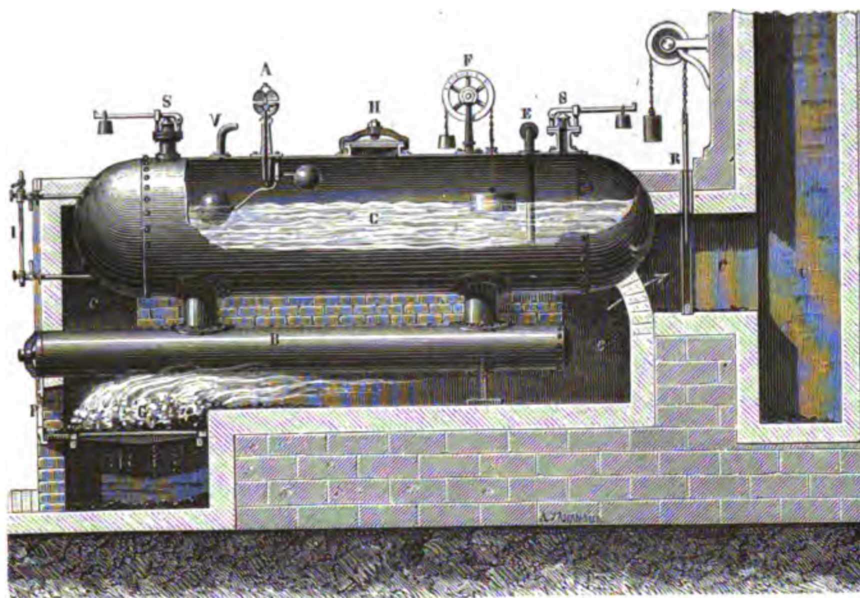


FIG. 263. — Chaudière à deux bouilleurs : coupe longitudinale.

A. Flotteur et sifflet d'alarme. — B. Bouilleur. — C. Corps de la chaudière. — E. Tuyau d'alimentation. — F. Flotteur indicateur de niveau, à cadran. — H. Trou d'homme pour le nettoyage. — S, S. Soupapes de sûreté. — R. Registre de tirage. — U. Cheminée. — V. Tuyau de prise de vapeur. — c, c. Carneaux. — I. Indicateur de niveau. — G. Foyer. — P. Porte du foyer.

Enfin, un troisième trajet les fait passer dans l'autre carneau latéral pour s'échapper dans la cheminée.

Le but qu'on se propose d'atteindre de la sorte est aisé à comprendre. Il s'agit d'utiliser, autant que possible, la chaleur qui émane du foyer, soit par le contact et l'action directe de la flamme, soit par celle des gaz de la combustion, lesquels, n'étant plus incandescents, n'en conservent pas moins une énorme quantité de chaleur. Or cette chaleur serait dépensée en pure

perte, si, en sortant du foyer, les gaz avaient la liberté de gagner immédiatement l'atmosphère.

C'est une préoccupation du même genre qui a fait imaginer les bouilleurs. Les anciennes et primitives chaudières étaient hémisphériques à leur partie inférieure; elles ne présentaient qu'une faible surface à l'action du foyer, eu égard à la masse de l'eau qu'il fallait vaporiser : elles n'avaient qu'une faible surface de chauffe. Augmenter la surface de chauffe des chaudières a été l'un des premiers progrès auxquels les constructeurs de machines (Watt le premier) ont dû songer. C'était tout simplement économiser le combustible, problème dont la solution, après bien des recherches heureuses, bien des progrès réalisés, est encore le *desideratum* des industries qui emploient la vapeur.

Il semble, d'après ce que nous venons de dire, que si les gaz de la combustion pouvaient, en arrivant à la base de la cheminée, être refroidis à une température égale à celle de l'air extérieur, par exemple, il y aurait tout bénéfice, puisque la chaleur du foyer ou du combustible serait à peu de chose près entièrement utilisée. Mais cela n'est malheureusement pas possible; ou plutôt, si l'on obtenait ce résultat, le tirage ou le renouvellement de l'air nécessaire à l'entretien de la combustion cesserait; du moins serait-il considérablement ralenti. La houille brûlant mal, la chaleur du foyer n'étant plus suffisamment intense, les gaz d'hydrogène *proto-* et *bicarbonés*, qui se dégagent en grande abondance du combustible, ne pourraient eux-mêmes brûler complétement. Ce sont eux qui forment la fumée épaisse et noire qu'on voit sortir si intense, toutes les fois qu'une quantité un peu considérable de combustible frais est introduite dans le foyer, qu'elle refroidit.

Les gaz chauds, en s'échappant dans la cheminée, servent donc à activer le tirage; c'est une dépense, nécessaire dans une certaine limite, bien qu'elle n'ait pas pour résultat direct l'échauffement de l'eau, ni sa transformation en vapeur. C'est ainsi que souvent, dans la pratique industrielle, une innovation

qui semble un progrès, quand on l'envisage sous une face, est un recul, considérée sous un autre point de vue.

C'est le moment de dire un mot de la cheminée, qui joue un si grand rôle dans le tirage. Plus la cheminée d'une chaudière est haute, la section restant la même ainsi que les autres conditions de la combustion, plus le tirage est actif. On a trouvé, par l'expérience, que la hauteur croît comme les carrés de l'intensité du tirage.

Si le tirage dépend de la hauteur de la cheminée, il dépend aussi du volume d'air dont celle-ci permet le passage, c'est-à-dire de la surface de sa section. D'après une règle donnée par Darcet, si la hauteur de la cheminée est 20 mètres, ou 30 mètres, la section devra avoir autant de fois 1 décimètre carré de surface qu'on doit brûler de fois par heure $4^k,5$, ou 6 kilogr. de houille. De sorte que la section d'une cheminée de 20 mètres de hauteur devra être égale à $\frac{180}{4,5}$ ou à 40 décimètres carrés, si le foyer doit consumer en une heure 180 kilogrammes de houille. Son diamètre intérieur, si elle est ronde, devra être égal à $0^m,71$; si elle est carrée, le côté aura $0^m,63$.

Dans certaines circonstances, il faut modérer le tirage. On y parvient de la façon la plus simple, au moyen d'un *registre* ou valve mobile, qu'on voit en R dans la figure 263, et à l'aide duquel on diminue à volonté l'ouverture que la cheminée offre à la fumée et aux gaz de combustion.

Il n'y a pas jusqu'à la grille, à la forme et aux dimensions de ses barreaux, des interstices qu'ils laissent entre eux, qui ne soient des éléments de grande importance pour le bon fonctionnement d'un fourneau, pour l'activité du feu, et, par suite, pour la vaporisation de l'eau, dans son rapport avec la dépense de combustible. Tout cela doit être calculé, disposé, agencé à la fois d'après les données de la science et de l'expérience.

Pour en finir avec le fourneau de la machine à vapeur, je dirai un mot, très-court, sur une question qui a fait un certain bruit dans l'industrie. Je veux parler de la possibilité d'obtenir ce qu'on appelle un foyer *fumivore*. C'est une mauvaise

expression que ce mot de fumivore, car jamais un foyer qui produit de la fumée ne s'en débarrasse, ne la détruit qu'en l'expulsant par la cheminée ou par la porte du foyer, ce qui, dans ce dernier cas, provient d'un tirage défectueux. La vraie question est celle-ci : installer un foyer dans lequel il ne se produise pas de fumée, ou, pour parler plus juste, dans lequel les gaz se dégageant du combustible soient brûlés le plus complétement possible. Quand le tirage ne fournit pas une quantité d'air assez abondante, les carbures d'hydrogène incomplétement brûlés s'échappent sous l'aspect d'une fumée noire et épaisse, très-désagréable, très-malpropre, mais dont les propriétaires de l'usine tiennent à se passer pour une raison plus positive, à savoir, parce que c'est le meilleur de la houille qui se perd ainsi sans avoir produit de chaleur.

Mais cet inconvénient grave du défaut de combustion peut se produire encore, alors même qu'il n'y a pas de fumée. La houille, outre les carbures hydrogénés dont nous venons de parler et qui se décomposent les premiers aussitôt que la combustion s'opère, renferme du carbone que l'oxygène transforme en oxyde de carbone, puis en acide carbonique, si le tirage fournit une quantité d'air suffisante. Si le tirage est mauvais, l'oxyde de carbone s'échappe sans avoir été brûlé complétement, et il peut y avoir perte considérable de chaleur, malgré l'absence de fumée. En un mot, un foyer dit *fumivore* n'est pas nécessairement économique.

Revenons à notre chaudière.

On a vu quelle est la forme d'ensemble du corps principal et des bouilleurs. Ceux-ci sont remplis entièrement par l'eau qui s'élève dans le corps de la chaudière jusqu'à une certaine hauteur. L'espace libre qui surmonte le niveau de l'eau est celui que remplit la vapeur avant d'aller exercer son action sur les organes de la machine : on le nomme pour cette raison *réservoir* ou *chambre de vapeur*.

La chambre de vapeur doit avoir, avec la capacité de la chaudière, un rapport de grandeur qu'on fait ordinairement

égal à un tiers dans la pratique. La raison du grand espace donné au réservoir vient de la nécessité de sécher le plus possible la vapeur formée; celle-ci entraîne presque toujours avec elle des gouttelettes liquides dont il faut éviter l'introduction dans le cylindre : nous verrons bientôt pourquoi.

Quant à la proportion qu'on donne à la capacité totale de la chaudière, relativement à la quantité de vapeur qu'elle doit fournir en une heure, pendant le fonctionnement normal, elle est basée sur l'intérêt qu'il y a à ne point faire varier trop vite la température : c'est ce qui arriverait si l'alimentation périodique de la chaudière, (laquelle se fait le plus souvent avec de l'eau froide) introduisait à la fois une trop grande quantité de liquide.

La force prodigieuse que recèle la vapeur d'eau portée à une haute température, et dont les effets s'exercent tout d'abord sur les parois intérieures de la chaudière, exige de la part de celles-ci une puissance de résistance qu'on n'obtient point sans certaines conditions de forme, d'épaisseur, de qualité des matériaux employés.

La meilleure forme, au point de vue de la résistance, est la forme cylindrique, qu'on termine aux deux bases par des fonds de forme sphérique. La matière adoptée généralement est la tôle de fer de première qualité, boulonnée avec le plus grand soin et la plus grande solidité. Il paraît que l'on commence à substituer l'acier au fer, mais dans certaines parties de la chaudière seulement : c'est avant tout une question de prix de revient.

Il y a quelques années, des ordonnances officielles réglaient les épaisseurs des tôles d'après les pressions moyennes évaluées en atmosphères que chaque chaudière était appelée à supporter. Aujourd'hui, les prescriptions de ce genre sont abandonnées et remplacées par une épreuve officielle à laquelle chaque constructeur est tenu de soumettre ses appareils [1].

1. Néanmoins il est bon de connaître la règle en question, que les mécaniciens utilisent toujours, par mesure de prudence. La voici : L'épaisseur était évaluée à

§ IV — Les Appareils de sûreté

Nous avons supposé la chaudière convenablement remplie d'eau qui, chauffée à la température nécessaire, fournit dans le réservoir une certaine quantité de vapeur possédant une pression qui varie selon les machines.

Il est d'une importance capitale que le niveau de l'eau ne s'abaisse point trop dans la chaudière, ni qu'il s'y élève au delà d'une certaine limite : dans les deux cas, on risque une des plus fréquentes causes d'explosion des machines. De là les appareils connus sous le nom générique d'*indicateurs du niveau* et qui méritent bien celui d'*appareils de sûreté*. On en emploie de plusieurs sortes et même simultanément.

Ainsi, vous voyez toujours adapté aux parois extérieures de la chaudière et bien en vue, un tube de verre de cristal I qui communique par ses deux bouts avec l'intérieur de la chaudière (fig. 263). L'eau pénètre dans ce tube et y atteint, en vertu de la loi d'équilibre des liquides dans les vases communicants, le même niveau que dans le générateur. Le verre du tube a besoin d'être bien propre et transparent; voilà pourquoi vous y voyez un double système de robinets qui permettent d'interrompre la communication avec la chaudière, et, pendant ce temps, de nettoyer le tube. Le chauffeur doit avoir fréquemment l'œil sur cet appareil, aussi précieux que simple.

Une surproduction momentanée de vapeur, un mauvais fonctionnement de la pompe d'alimentation provenant d'un accident subit, pourraient abaisser brusquement le niveau et surprendre notre homme pendant qu'il est occupé ailleurs. L'indicateur à tube de cristal ne suffit donc point. On y ajoute l'un

$0^m,003$, auxquels on ajoutait le produit de $1^{mm},8$ par le nombre d'atmosphères et par le diamètre de la chaudière mesuré en mètres et fractions de mètre. Appliquons cette règle à une chaudière de $1^m,20$ de diamètre, destinée à supporter une pression de 4 atmosphères et demie. L'épaisseur de la tôle sera :

$3^{mm} + 1^{mm},8 \times 1,20 \times 4,5$, c'est-à-dire $3^{mm} + 9^{mm},72$, ou en tout 12 millimètres 7 dixièmes.

ou l'autre des divers systèmes de flotteurs qui manifestent l'état insuffisant du niveau par des signaux bruyants. Tels sont, par exemple, les *flotteurs d'alarme*, le *flotteur magnétique*.

Un flotteur (c'est ordinairement une boule métallique creuse) monte et descend avec le niveau de l'eau de la chaudière. Il est soutenu par une tige qui forme un bras d'un levier tournant autour du point fixe; l'autre bras supporte un contre-poids. Dans les limites normales du niveau de l'eau, la tige maintient une soupape contre l'ouverture d'un tuyau communiquant avec l'air extérieur. Si le niveau de l'eau s'abaisse au-dessous de ces limites, le flotteur s'abaisse avec lui et détermine l'ouverture de la soupape. La vapeur s'échappe par le canal et sort par un orifice annulaire; là elle rencontre les bords aigus d'un timbre A, qu'elle fait vibrer de manière à produire un son très-intense et prolongé.



Fig. 264. — Indicateur magnétique de M. Lethuilier-Pinel.

Le chauffeur est averti du danger par ce son inaccoutumé : de là le nom de *flotteur d'alarme* donné à cet appareil.

Le *flotteur indicateur à cadran* (fig. 263) est formé d'un disque de pierre, qu'une chaîne de suspension, s'enroulant sur la gorge d'une poulie à cadran extérieur F, soutient et équilibre par un contre-poids. Le mouvement de la poulie déterminé par les variations du niveau se communique à une aiguille qui indique ainsi la hauteur de l'eau dans la chaudière.

Dans l'*indicateur magnétique* de M. Lethuilier-Pinel, qu'on emploie beaucoup aujourd'hui, le mouvement du flotteur se manifeste par une tige qui fait monter ou baisser avec lui un

aimant en fer à cheval; au devant des pôles de cet aimant, une aiguille aimantée, mobile sous l'influence de leur attraction, parcourt les degrés d'une division qui marque le niveau de l'eau de la chaudière. Quand ce niveau baisse d'une façon anormale et dangereuse, l'aimant entraîne avec lui le bras d'un levier qui fait ouvrir une soupape, auparavant maintenue par un ressort. La vapeur qui, de la chaudière, entre librement dans le tube renfermant tout le mécanisme, s'échappe en sifflant au dehors et avertit le chauffeur du danger.

Les appareils de sûreté d'une machine à vapeur ne comprennent point seulement les indicateurs de niveau, flotteurs ou autres. C'est que les causes d'explosion ne proviennent pas exclusivement de l'insuffisance de l'eau du générateur : dans des circonstances que je préciserai plus loin, la vapeur peut acquérir une force élastique dépassant tout à coup, et de beaucoup, les limites de pression pour lesquelles la chaudière a été construite. Pour prévoir ce cas, on adapte des soupapes de sûreté dont la figure 263 représente en S, S, la disposition ordinaire. Le jeu en est si simple, qu'il est inutile de le décrire au long.

Il nous reste à dire comment on peut s'assurer à chaque instant, pendant le fonctionnement d'une machine, des variations de la tension de sa vapeur. Les instruments qui fournissent cette indication en atmosphères sont connus sous le nom de *manomètres*.

Mais les manomètres employés ne sont pas tous basés sur le même principe. Les uns, comme le *manomètre à air libre*, sont tout simplement des baromètres à siphon dont la grande branche *b* est ouverte; seulement, ce n'est pas la pression de l'air atmosphérique qui soulève la colonne de mercure, c'est celle de la vapeur, la petite branche étant mise en communication directe en *a* avec la chambre de vapeur de la chaudière. C'est la différence des hauteurs du mercure dans les deux branches, augmentée de la pression barométrique, qui exprime la pression de la vapeur.

Les *manomètres à air comprimé* (fig. 266, 267) ne sont autre chose que des tubes de Mariotte. Par l'une des branches, la vapeur exerce librement la pression, qui, dans l'autre branche, est équilibrée par l'air comprimé, plus par la différence de niveau du mercure. L'instrument est réglé de telle sorte, que le mercure est à une même hauteur *mn* dans les deux branches, si la pression de la vapeur vaut une atmosphère. Quand cette pression devient graduellement plus forte, le niveau s'élève



FIG. 265. — Manomètre à air libre.

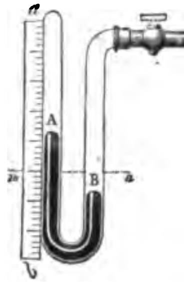


FIG. 266. — Manomètre à air comprimé.



FIG. 267. — Manomètre à tube conique.

en A, mais à des hauteurs décroissantes pour d'égales augmentations de pression, selon la loi de Mariotte. L'instrument est donc de moins en moins sensible aux pressions les plus élevées. On remédie à cet inconvénient en donnant au manomètre la disposition que montre la figure 267. La forme conique de la branche qui renferme l'air donne aux divisions correspondant aux atmosphères successives des longueurs à peu de chose près égales, de sorte que la lecture des pressions élevées se fait plus aisément que dans le premier système.

La commodité et le bon marché des *manomètres métalliques* (fig. 268) les font adopter dans un grand nombre de machines. Mais ils n'offrent pas la même garantie d'exactitude que les autres, parce que les pièces qui subissent la pression de la vapeur

peuvent s'altérer par l'usage. Comme ce sont ces pièces qui indiquent, par le plus ou moins de courbure que leur imprime la force élastique de la vapeur, la valeur de celle-ci, il faut de temps à autre les soumettre à des vérifications, à des contrôles avec les manomètres plus exacts. L'inconvénient de ceux-ci vient surtout de la matière qui les compose, du verre qui s'encrasse et perd sa transparence, et au travers duquel il faut observer le mercure, puis de leur fragilité ; il arrive aussi que le mercure du manomètre à air comprimé s'oxyde, ce qui diminue le volume de l'air : alors l'instrument marque des pressions plus fortes que la pression réelle.



FIG. 268.

Tel est, dans ses parties essentielles, l'appareil générateur de vapeur connu dans la pratique sous le nom commun de *chaudière*. La chaudière, je l'ai déjà dit, varie beaucoup de dimensions et de formes, selon les types de machines auxquelles elle fournit la force ou le moteur. Nous allons voir successivement quelles sont les dispositions les plus usitées et les plus originales des chaudières dans les machines fixes, dans les machines marines et dans les machines mobiles, locomotives ou locomobiles.

§ V — PRINCIPAUX TYPES DE CHAUDIÈRES A VAPEUR.

Quand on veut faire bouillir de l'eau dans une marmite, l'idée la plus naturelle, la plus simple, est de mettre tout bonnement la marmite sur le feu : on ne songe guère à mettre le feu dans la marmite. Cela paraîtrait le renversement du bon sens. C'est cependant cette dernière idée qui est venue aux constructeurs de machines à vapeur. Au lieu de placer la chaudière sur le feu, ils se sont dit qu'il y aurait avantage à procéder

d'une façon inverse, et à mettre le feu dans la chaudière. De cette manière, l'utilisation du combustible, cette condition première de l'industrie de la vapeur, se trouve réalisée à un plus haut degré.

Dans la chaudière à bouilleurs que nous venons de décrire, la chaudière est sur le feu : c'est un générateur *à foyer extérieur*. Il y a donc aussi des générateurs *à foyer intérieur*, et, sous ce seul rapport, on peut former deux types de chaudières qui se subdivisent d'ailleurs en de nombreuses variétés. Enfin, on peut distinguer un troisième type, celui dans lequel le foyer proprement dit est extérieur et dont les carneaux ou conduits des gaz de la combustion sont logés dans l'intérieur de la capacité renfermant l'eau. Ce sont les générateurs ou *chaudières mixtes*.

Les premières chaudières adoptées dans les machines de Watt étaient des chaudières en forme de chariot ou *en tombeau*, à paroi inférieure en forme de voûte surbaissée. La flamme, après avoir échauffé directement la surface concave inférieure, revenait sur elle-même par des carneaux latéraux. Plus tard, elle a été employée sur les premiers bateaux à vapeur; mais alors on y ajouta un carneau intérieur, par où passaient d'abord les gaz de la combustion avant d'entrer dans les carneaux latéraux, de manière à en former une chaudière mixte. La forme des parois de la chaudière en tombeau la rend peu résistante; aussi l'histoire des accidents des machines à vapeur constate-t-elle que le plus grand nombre des explosions a eu lieu sur des chaudières de ce système. Mais presque partout elles ont été remplacées.

Nous avons décrit la chaudière à deux bouilleurs inférieurs; quelquefois il n'y a qu'un bouilleur; certaines chaudières en ont jusqu'à trois. Une disposition intéressante et originale est celle des bouilleurs latéraux de la chaudière Farcot. Dans ce système (fig. 269), le corps cylindrique principal A est chauffé directement par le foyer. Quatre bouilleurs sont placés verticalement les uns au-dessus des autres, dans un bâti latéral

divisé en quatre compartiments ou carneaux, par lesquels sont obligés de passer successivement les gaz de la combustion avant de se rendre dans la cheminée. De plus, c'est le bouilleur inférieur A′ qui reçoit l'eau d'alimentation. Comme les gaz cheminent de haut en bas, tandis que l'eau suit un chemin inverse pour aller de A′ dans la chaudière, il en résulte que ce sont les parties les plus chaudes des gaz qui sont en contact avec les parois les plus chaudes de la chaudière; les parties les plus froides perdent encore leur chaleur à échauffer l'eau la plus froide, avant de s'échapper dans la cheminée.



Fig. 269. — Chaudière à bouilleurs latéraux, système Farcot.

Imaginons que le corps cylindrique d'une chaudière renferme un tube intérieur d'un suffisant diamètre entièrement entouré par l'eau; qu'on place le foyer dans ce tube, au lieu d'en faire seulement un carneau comme celui de la chaudière décrite plus haut: on aura une *chaudière à foyer intérieur*. Dans ce système, la chaleur du foyer est tout entière utilisée et employée à l'échauffement direct des parois métalliques de la chaudière, sans être absorbée par les maçonneries du bâti. Mais la surface de chauffe ne serait point encore assez grande, si la chaudière n'était extérieurement enveloppée par des carneaux, et alors les inconvénients d'un foyer nécessairement rétréci ne sont plus compensés par les avantages de cette disposition. Toutefois, en Angleterre, on emploie pour les machines fixes des chaudières horizontales à un ou deux foyers intérieurs.

Dans la plupart des modifications qu'a subies la chaudière primitive, on retrouve la préoccupation de développer le plus possible la surface de chauffe, tout en ménageant le volume et l'emplacement occupé par le générateur. Les bouilleurs, les

carneaux intérieurs ou extérieurs, les foyers intérieurs, tout cela est imaginé dans le but d'utiliser l'activité du foyer, de manière à ne laisser s'échapper dans la cheminée que la portion des gaz chauds nécessaire pour produire le courant ascendant, c'est-à-dire le tirage.

Enfin, peu à peu on en arriva à concevoir la chaudière tubulaire, dont la première idée remonte à Barlow (1793), mais qui ne fut réalisée qu'en 1829, par Marc Seguin et Stephenson. Voici en quoi consiste le système des chaudières tubulaires, qui, appliqué d'abord sur les chemins de fer à la locomotive, a été adapté aux machines de navigation, avec les modifications indispensables.

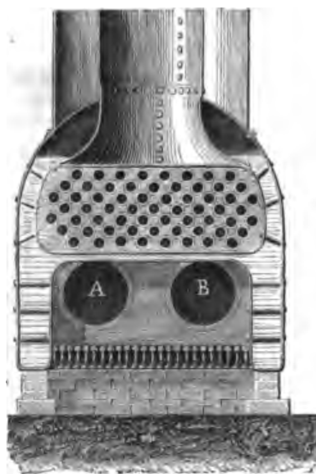


Fig. 270. — Chaudière tubulaire marine, à retour de flamme.

Dans le corps cylindrique principal se trouvent soudés parallèlement entre eux des tubes qui s'ouvrent d'une part dans le foyer, d'autre part dans les carneaux ou dans la cheminée. Les tubes sont baignés par l'eau de la chaudière, qui remplit tous leurs intervalles, et qui se trouve directement échauffée par les gaz traversant tous les espaces tubulaires. On verra plus loin dans quelle proportion énorme cette disposition ingénieuse accroît la surface de chauffe, et par suite la puissance de vaporisation du générateur.

Dans les locomotives, les locomobiles et les chaudières marines, le foyer se trouve de tous côtés entouré d'eau, sauf, bien entendu, par sa base, de sorte que la chaudière tubulaire pourrait aussi être considérée comme une chaudière à foyer intérieur. Elle en a certainement tous les avantages.

La figure 270 donne un exemple d'une chaudière tubulaire marine, qui est en même temps une *chaudière à retour de flamme*, puisque les gaz du foyer, avant de lécher les tubes, passent d'abord dans deux gros cylindres A et B, se réfléchis-

sent sur le fond de la chaudière, et reviennent enfin, par les conduits tubulaires, dans la cheminée, où ils s'échappent.

Outre les types qu'on vient de définir, il y a des chaudières dont le foyer peut être enlevé à volonté, *à foyer amovible*, selon l'expression technique. Cette disposition peut offrir des avantages de plus d'un genre, notamment celui d'un nettoyage rapide et de l'enlèvement des incrustations. Il y a aussi des *chaudières à circulation d'eau*, principalement formées de tubes

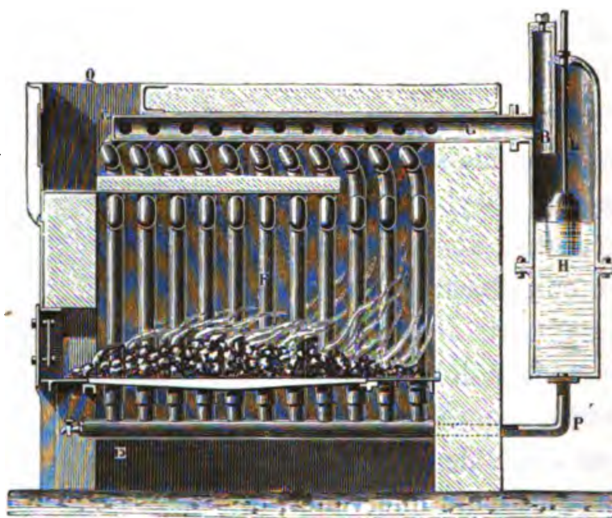


Fig. 271. — Chaudière à circulation, système Belleville.

où l'on introduit continuellement et successivement l'eau, qui se vaporise presque instantanément, de sorte que si l'introduction de l'eau est interrompue, il en est de même de la production et de l'écoulement de la vapeur; des *chaudières chauffées au gaz*, généralement employées dans les hauts fourneaux, où l'on utilise de la sorte les gaz perdus à leur sortie du gueulard, etc., etc.

De tous ces systèmes de chaudières, retenons-en un qui nous montrera comment on peut construire des générateurs pour ainsi dire rendus inexplosibles, par ce fait que l'eau, aussitôt introduite, est immédiatement réduite en vapeur : c'est la

chaudière à circulation de M. Belleville, dont l'usage se répand de plus en plus dans la petite et la moyenne industrie, dans les centres populeux. Elle est utilisée dans plusieurs imprimeries et usines parisiennes. Une série de tubes verticaux, placés dans le foyer même, communiquent d'une part à un tuyau horizontal amenant l'eau d'alimentation, d'autre part au tuyau de prise de vapeur. Chaque tube est rempli d'eau jusqu'à une hauteur la même pour tous, et forme pour ainsi dire une petite chaudière à moitié remplie d'eau et de vapeur. L'arrivée de l'eau dans les tubes est réglée à l'aide d'un appareil spécial, par la pression même de la vapeur, de sorte qu'à mesure que l'eau se vaporise, elle se trouve remplacée par une quantité d'eau égale : le niveau dans les tubes de la chaudière reste ainsi constant.

La mise en vapeur est pour ainsi dire immédiate : pour une chaudière de ce système d'un volume moindre de 4 mètres cubes ($3^{m},74$) et de 10 mètres carrés de surface de chauffe, la vaporisation est de 200 kilogrammes d'eau par heure.

Il existe encore d'autres systèmes de chaudières à circulation, en France ceux de MM. Larmangeat, Boutigny; en Angleterre celui de M. Scott. Je ne puis que les citer, en résumant en quelques lignes, d'après M. le général Morin, les avantages respectifs des grandes chaudières ordinaires comparées à ces systèmes nouveaux.

Les premières ont pour elles la sanction d'une longue expérience; elles produisent, sans beaucoup de soin et d'entretien, et très-régulièrement, la vapeur nécessaire; la manœuvre journalière en est simple, commode. Mais elles occupent un grand espace; elles sont sujettes aux explosions.

Au contraire, les chaudières à circulation, beaucoup moins encombrantes et moins coûteuses, pour ainsi dire inexplosibles, ont l'avantage d'une mise en vapeur rapide; mais elles sont d'un entretien plus difficile; elles ne sont pas plus économiques au point de vue du combustible. Elles paraissent surtout réservées aux machines de la petite industrie.

CHAPITRE VI

LA MACHINE A VAPEUR — LE MÉCANISME MOTEUR

—

§ I — Le Cylindre moteur

La vapeur étant produite, voyons comment on en utilise la force élastique.

La vapeur sort du réservoir de la chaudière par un tuyau qui la conduit à l'intérieur d'un cylindre; alternativement elle agit sur une face ou sur l'autre d'un piston mobile dans ce cylindre; et enfin de cette action alternative résulte un mouvement de va-et-vient du piston et de sa tige. Étudions les détails de ce mécanisme.

La vapeur, arrivant à la chaudière dans le cylindre, agit d'abord sur l'une des faces du piston, qui se trouve poussé vers l'extrémité opposée. A ce moment, la vapeur doit pénétrer de l'autre côté du corps de pompe et exercer son action sur l'autre face du piston. Pour que cette action soit possible, il est nécessaire qu'on se débarrasse de la vapeur qui vient d'agir en sens inverse, parce que la force élastique qu'elle possède encore s'opposerait au mouvement. On parvient à ce résultat en donnant alternativement à la vapeur qui a joué son rôle une issue à l'extérieur du cylindre. L'espace dans lequel elle pénètre est

tantôt l'air libre, tantôt un vase vide d'air et maintenu, par un jet continu d'eau froide, à une basse température.

Dans le premier cas, qui est toujours celui des machines où la vapeur fonctionne *à haute pression*, c'est-à-dire avec une force élastique égale à plusieurs atmosphères, la vapeur qui vient de travailler s'échappe, et sa tension se trouve rapidement réduite à celle de l'atmosphère elle-même, ce qui permet à la vapeur d'agir sur la surface opposée au piston.

Dans le second cas, la vapeur se condense brusquement par son introduction dans l'espace vide et froid qui, pour cette raison, est nommé *condenseur*. Sa force élastique, qui pouvait n'être guère supérieure à une atmosphère, est instantanément annulée, ou du moins grandement réduite, de sorte que la chambre du cylindre où elle vient d'agir est elle-même ramenée au vide : la vapeur introduite de l'autre côté n'a donc plus à vaincre que l'obstacle du piston lui-même.

Les divers mécanismes imaginés pour conduire ainsi la vapeur dans le cylindre de chaque côté du piston, puis à l'air libre, ou dans un condenseur pour détruire ou réduire, dès qu'elle a agi, sa force élastique, constituent ce qu'on nomme la *distribution de la vapeur;* on va voir quels sont les principaux systèmes employés dans ce but.

Parlons d'abord du *cylindre*, la pièce capitale du mécanisme moteur.

C'est, le plus ordinairement (fig. 274), une pièce coulée en fonte dont l'intérieur, de forme parfaitement cylindrique, a été tourné et alésé avec le plus grand soin; un des fonds est quelquefois venu de fonte, d'autres fois vissé solidement comme l'autre fond, de manière que l'un des deux au moins puisse être enlevé entièrement et permettre ainsi l'introduction du piston.

L'un des fonds donne passage à la tige du piston, et l'ouverture qui sert à cet objet est munie d'une boîte à étoupe (*stuffing-box*), afin que la tige, dans son mouvement, ne présente aucune fuite à la vapeur du cylindre.

Quant au piston lui-même, on le construit d'une foule de manières différentes. Le plus souvent il est formé de deux plateaux métalliques d'un diamètre un peu plus petit que celui du cylindre et solidement reliés entre eux, ainsi qu'à la tige qui les traverse. Sur leur pourtour, sont ménagées des gorges pour loger la *garniture*, c'est-à-dire la partie du piston dont la surface extérieure doit glisser à frottement doux, mais parfaitement étanche contre la surface intérieure du cylindre, de manière que la vapeur ne puisse passer de l'une des chambres dans l'autre. La garniture était jadis formée de tresses de

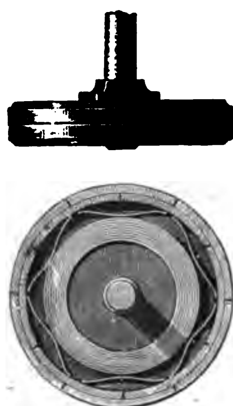


Fig. 272. — Piston à ressort.



Fig. 273. — Piston suédois.

chanvre qu'il fallait graisser souvent et remplacer de même, à cause de la rapidité de l'usure. On y a substitué avantageusement des garnitures métalliques, formées de fragments d'anneau pressés par des ressorts intérieurs, comme on le voit dans la figure 272. Aujourd'hui, on préfère encore à ce mode de garniture celui des pistons Ramsbottom, dont le corps se compose d'un plateau unique, évidé pour avoir plus de légèreté et entouré de deux cercles d'acier doux fondu qui s'engagent dans deux gorges extérieures et font ressort. La surface de ces cercles presse ainsi les parois du cylindre, formant une excellente garniture, très-simple et très-peu coûteuse d'entretien. Le *piston suédois* (fig. 273) ne diffère du précédent que

par la largeur des cercles, qui est plus grande, et leur composition, qui est de fonte durcie par un peu d'étain.

§ II — Distribution de la vapeur

Le piston et le cylindre ainsi construits et agencés, il nous reste à voir comment se fait l'introduction et l'échappement, en un mot la *distribution de la vapeur*.

Reportons-nous à la figure 274, qui donne la section longitudinale d'un cylindre. On voit en *a*,*a'*, près de chacun des fonds, l'ouverture d'un double conduit *aa*, *a'a'*, pratiqué dans l'épaisseur de la face latérale : ce sont les ouvertures par où la vapeur arrive alternativement et agit sur l'une, puis sur l'autre face du piston; on les nomme les *lumières d'admission*. Ces deux lumières débouchent extérieurement sur une face bien dressée, et, entre les deux, on voit une troisième ouverture E, qui sert à faire échapper la vapeur quand elle a produit son effet, et qu'on nomme pour cette raison, *lumière d'échappement*. C est le tuyau par où la vapeur se répand à l'air libre, ou bien va perdre sa force élastique dans le condenseur.

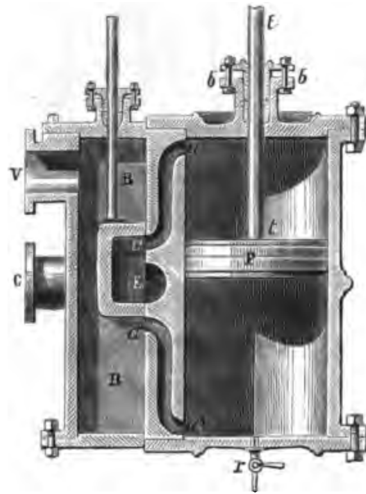


Fig. 274. — Coupe longitudinale d'un cylindre.

Maintenant, par quel mécanisme s'opère la distribution, formée, comme on voit, de deux opérations partielles, l'admission de la vapeur et l'échappement, qui doivent se répéter deux fois pour obtenir une phase complète du mouvement de va-et-vient du tiroir? Il y a divers modes employés suivant les machines : décrivons d'abord celui que représente notre dessin.

On voit, dans la *boîte à vapeur* BB, une boîte prismatique ouverte par une face, et qu'on nomme le *tiroir*. Le tiroir s'applique par sa face ouverte contre le plan bien dressé où nous venons de voir que débouchent extérieurement les trois lumières. L'espace BB se nomme la boîte à vapeur, parce qu'en effet la vapeur amenée de la chaudière par le tuyau V y afflue librement; mais la capacité du tiroir, au contraire, est toujours fermée à la vapeur affluente, tandis qu'elle communique constamment avec le tuyau d'échappement, et aussi tantôt avec

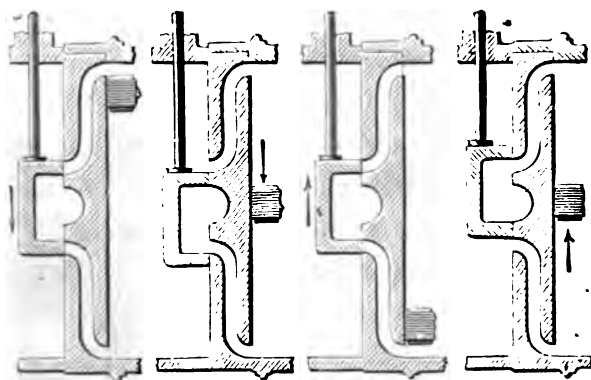


FIG. 275. — Phases du mouvement de va-et-vient du piston et du tiroir.

l'un, tantôt avec l'autre des conduits d'admission du cylindre. Enfin, le mouvement du tiroir est produit par la machine même à l'aide d'une tige et d'un excentrique calé sur l'arbre du volant.

En suivant le mouvement successif et alternatif du tiroir représenté sur la figure 275, on comprendra aisément les phases de la distribution de la vapeur.

Tel est le mécanisme de la distribution de la vapeur dans les machines où le *tiroir à coquilles* est adopté. Mais, comme je l'ai dit, il y a eu et l'on emploie encore d'autres dispositions. C'est d'abord le système des *soupapes de distribution* de Watt; puis le *tiroir à pistons*, également imaginé par cet inventeur; enfin, le *tiroir en D*, dont le nom est dû à la ressemblance de la section de la pièce principale avec la lettre D (fig. 276).

Dans le premier de ces trois systèmes, deux boîtes à soupapes sont adaptées aux deux extrémités du corps du cylindre. Chacune d'elles se trouve divisée par deux soupapes mues par un système de tringles en trois compartiments, dont celui du milieu est en communication directe avec chaque lumière; tandis que les deux autres communiquent, le supérieur avec le tuyau de vapeur, l'inférieur avec l'air extérieur ou le condenseur.

Le *tiroir à pistons* est ainsi nommé parce que ce sont deux pistons, mus par une tige dans un espace cylindrique con-

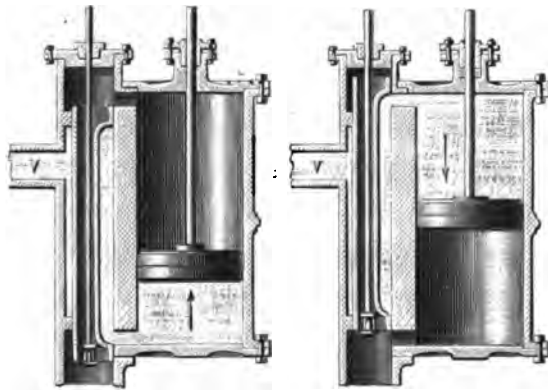


FIG. 276. — Distribution de la vapeur : tiroir en D.

tigu au cylindre, qui tantôt laissent à la vapeur l'accès libre d'une des lumières d'admission, et de la chambre correspondante du cylindre, tantôt mettent cette chambre et la vapeur qui vient d'agir en communication avec le condenseur.

Enfin, le *tiroir en D* (fig. 276) est une pièce creuse, mobile dans la boîte à vapeur, qui s'applique et glisse par ses deux extrémités planes contre la face du cylindre où viennent aboutir les lumières d'admission. La vapeur qui vient de la chaudière par l'ouverture V peut toujours circuler autour du tiroir sans pénétrer jamais par l'une ni par l'autre de ses extrémités; celles-ci sont au contraire sans cesse en libre communication avec le condenseur. Les deux bords plans du tiroir, dans leur mouvement

de va-et-vient laissent donc alternativement l'une des lumières recevoir la vapeur de la chaudière, pendant que la vapeur, après son action sur le piston, sort par l'autre lumière et se précipite dans le condenseur ou à l'air libre.

Dans chacun de ces modes de distribution, il est aisé de saisir les mouvements correspondants du piston, des tiroirs et des soupapes, dans leurs diverses phases. Ce que nous avons dit, en décrivant le tiroir à coquilles, suffira pleinement à en donner l'intelligence.

§ III — Détente de la vapeur

En se reportant aux allées et venues correspondantes du piston et des diverses pièces qui constituent le mode de distribution de la vapeur, on peut voir que nous avons toujours supposé que les deux lumières du cylindre avaient la même largeur que les bandes pleines du tiroir, de sorte qu'elles se trouvaient tantôt entièrement recouvertes, tantôt entièrement libres. De là il résulte que la vapeur de la chaudière afflue à pleine pression sur chaque face du piston pendant toute la durée de la course de celui-ci : c'est ce qu'on exprime en disant que la *vapeur travaille à pleine pression.*

A l'origine, on ne connaissait point d'autre moyen de faire agir la vapeur. Watt, dont on retrouve le nom dans presque toutes les découvertes capitales qui ont transformé la machine à vapeur primitive, a trouvé qu'il y avait un double avantage à ne donner accès à la vapeur de chaque côté du cylindre que pendant une partie seulement de la course du piston : il en résulte d'abord une plus grande régularité dans le mouvement même; puis, à égalité de travail, une notable économie de vapeur, et par conséquent de combustible.

La vapeur, introduite par exemple pendant le premier tiers seulement de la course du piston, continue d'agir sur celui-ci;

mais comme l'espace qu'elle occupe ensuite va en augmentant jusqu'à la fin, elle agit en se dilatant comme un ressort qui se détend, de sorte que sa force diminue jusqu'à la fin de la course du piston. On dit alors que *la vapeur travaille avec détente.*

Ce mode d'action de la vapeur est aujourd'hui presque universellement adopté. Mais avant d'insister sur les avantages qu'il présente, et de préciser l'économie de vapeur ou de combustible à laquelle la détente donne lieu, il faut que nous montrions par quelle modification du mécanisme de distribution on parvient à l'obtenir.

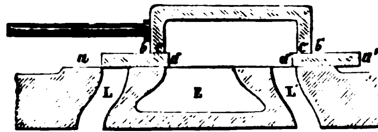


Fig. 277. — Système de détente de Clapeyron : tiroir à recouvrement.

Là encore, si je voulais faire un traité complet de la machine à vapeur, j'aurais à décrire des systèmes variés de détente. Il me suffira, pour le but que je me propose, de donner une idée d'un ou deux des plus importants.

Commençons par le *système de détente* dit *de Clapeyron*, parce que la disposition en est due à ce savant ingénieur.

Elle consiste dans une simple modification du tiroir, ou plutôt de la largeur des bandes qui recouvrent les lumières. Au lieu de donner à cette largeur la dimension précise de celle de chaque lumière, on la fait plus grande. Les rebords *ab*, *a′b′*, *cd*, *c′d′*, extérieurs et intérieurs, forment ce qu'on nomme le *recouvrement* du tiroir, parce que l'objet de ces saillies est de diminuer la durée de l'admission de la vapeur dans le cylindre par chacune des deux lumières. Il faudrait entrer dans des détails trop longs, trop techniques, pour suivre le mouvement du tiroir à détente dans toutes ses phases et pour faire voir clairement quel est, aux mêmes phases, le mode d'action de la vapeur. Mais nous pouvons résumer cette action en disant

que chaque introduction de la vapeur dans le cylindre donne lieu à quatre périodes successives que nous allons caractériser.

Dans la première période, il y a *admission de la vapeur*, qui travaille pendant ce temps à pleine pression, c'est-à-dire avec la pression de la chaudière; après quoi la lumière d'admission se ferme.

Dans la seconde période, il y a *détente de la vapeur* admise, qui alors travaille avec une force décroissante jusqu'au moment où la lumière s'ouvre à l'échappement.

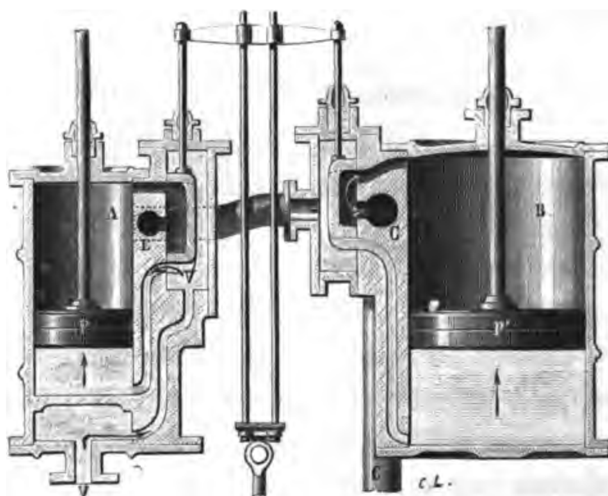


FIG. 278. — Coupe des deux cylindres dans le système de détente de Woolff.

L'*échappement* caractérise donc la troisième période; mais comme, par le fait du recouvrement, l'échappement cesse avant que le piston ait atteint le fond du cylindre, il y reste une certaine quantité de vapeur que le piston refoule et comprime un peu avant le début de la période nouvelle d'admission.

De là, la *période de compression*, qui termine le cycle des mouvements alternatifs du tiroir, et ramène le piston à la même position initiale.

La détente de Clapeyron est surtout employée dans les machines à mouvements rapides, telles que les locomotives.

Dans le système de détente de Meyer, le tiroir est percé de

deux orifices qui viennent alternativement communiquer avec les lumières d'admission : ce sont deux blocs, ayant un mouvement indépendant de celui du tiroir, qui viennent fermer ces orifices, faire cesser l'admission et commencer la détente.

Enfin, dans le système Woolff, la détente n'a pas lieu dans le cylindre lui-même, mais dans un cylindre de plus grand

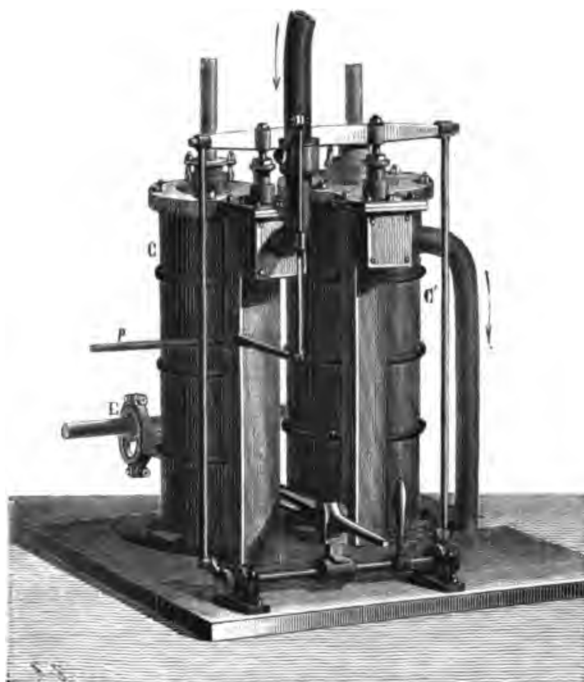


FIG. 279. — Système de distribution et de détente de Woolff : les deux cylindres.

diamètre, juxtaposé au premier (fig. 279). C'est pour cela qu'on donne aux machines à vapeur qui emploient ce mode de détente, le nom de *machines à deux cylindres*.

La figure 278 va faire comprendre le mécanisme de la distribution dans ces machines.

Chacun des deux cylindres A, B, est muni d'une boîte à vapeur où se meut un tiroir ordinaire, et des lumières d'admission et d'échappement disposées comme on sait.

C'est par l'orifice V qu'arrive la vapeur de la chaudière,

laquelle se répand d'abord dans la boîte du cylindre A, et de là pénètre au-dessous du piston P, par exemple. Ce piston reçoit donc un mouvement de bas en haut; il refoule la vapeur qui était de l'autre côté dans le tuyau d'échappement E, tuyau qui, au lieu de communiquer avec le condenseur comme dans les machines à un seul cylindre, va déboucher dans la boîte à vapeur du cylindre B. Là elle pénètre par la lumière inférieure d'admission au-dessous du piston P'; et en s'y détendant, elle produit également le mouvement ascendant de ce piston. Quant à la vapeur qui se trouvait de l'autre côté dans la chambre supérieure du grand cylindre, elle va, comme à l'ordinaire, se condenser dans le tuyau CC ou à l'air libre.

Le mouvement simultané des deux tiroirs en sens inverse donnera lieu à un mouvement des deux pistons de haut en bas, la vapeur agissant à pleine pression dans le petit cylindre, tandis que dans le grand cylindre elle agit toujours avec détente.

§ IV — Le Mécanisme de transmission

Il nous reste à montrer comment le mouvement du piston est transmis, par quel mécanisme on le transforme, on le règle, on en assure la régulière continuité. Le problème à résoudre n'est pas spécial aux machines à vapeur. Un moteur quelconque peut donner lieu à la même question : « Étant donné le mouvement de va-et-vient de la tige d'un piston, c'est-à-dire un mouvement alternatif et rectiligne, trouver un mode de transmission qui le change en mouvement continu et circulaire, qui fasse tourner, par exemple, un arbre moteur auquel tous les mouvements partiels dont l'usine peut avoir besoin viendront puiser simultanément ou à leur tour. »

Passons rapidement en revue les différents systèmes imaginés.

Le plus ancien, qui est encore adopté pour un grand nombre de machines, comprend les *machines à balancier*, dont la figure 280 donne le principe.

La tige *t* du piston, dont l'extrémité décrit une ligne droite verticale, est reliée à l'extrémité d'une grande pièce oscillante, ou levier, AB, qu'elle fait mouvoir autour d'un point fixe I, dans un plan vertical. Cette pièce est le *balancier*, à l'autre extrémité duquel s'articule une tige ou *bielle*, qui agit à son tour sur une manivelle calée en O sur l'arbre à mettre en mouvement. Grâce à cette disposition, le mouvement rectiligne alternatif du piston se trouve transformé en mouvement circu-

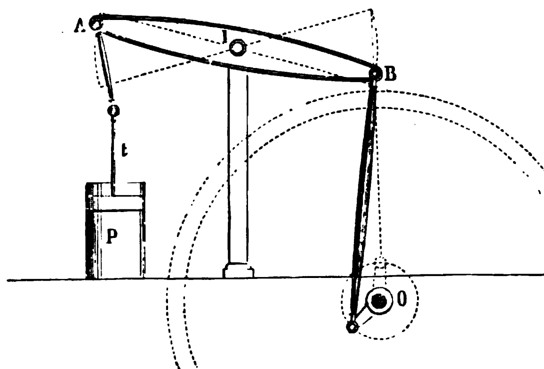


FIG. 280. — Principe de la transmission dans les machines à balancier.

laire continu. Ici, le balancier est au-dessus de la tige du piston; mais il peut aussi être placé au-dessous, et nous verrons des exemples de cette disposition dans les machines à vapeur marines.

Par le balancier, la bielle et la manivelle, le mouvement alternatif et rectiligne du piston se trouve transformé en mouvement circulaire continu; mais cette transformation n'est pas directe, car les extrémités du balancier oscillent en décrivant chacune un arc de cercle, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre; le mouvement est donc d'abord circulaire alternatif; c'est la bielle et la manivelle qui achèvent la transformation et produisent la continuité du mouvement circulaire. Il résulte de là que la tige du piston, qui se meut verticalement, ne peut être directement liée à l'extrémité du balancier, parce

que celle-ci la forcerait à suivre le contour de l'arc, et dès lors la courberait tantôt à droite, tantôt à gauche. Dans le but d'éviter cet inconvénient, qui détériorerait promptement la machine, Watt a imaginé un système d'articulation fort ingénieux, connu sous le nom de *parallélogramme de Watt*, et dont voici la description succincte :

La tige du piston, au lieu d'être liée directement à l'extrémité E du balancier, l'est au sommet D du parallélogramme CBDE, dont les quatre côtés, rigides et de dimensions invariables, sont articulés aux sommets, de sorte que les angles varient suivant le mouvement qu'impriment les oscillations du balancier. De plus, le sommet B est rattaché, par une tige BO, à un point fixe O du bâti de la machine. Les longueurs relatives de ces diverses lignes sont calculées de telle sorte que le sommet D décrit très-sensiblement une ligne droite verticale, pendant que les points C, E, B, décrivent des arcs de cercle ayant pour centres les deux points O,O. A la vérité, pour qu'il en soit ainsi, l'oscillation du balancier ne doit pas dépasser les limites de 20° de part et d'autre de l'horizontale. Le point milieu du côté BC jouit de la même propriété que le point D : aussi l'utilise-t-on dans les machines de Woolff, où les pistons des deux cylindres doivent se mouvoir d'ensemble.

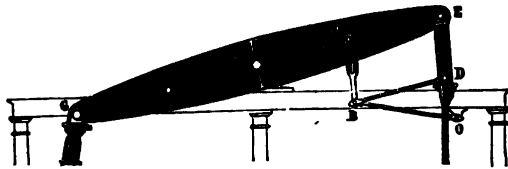


FIG. 281. — Parallélogramme articulé de Watt.

On comprend que le système qu'on vient de décrire se reproduit en double, dans le sens de l'épaisseur, de chaque côté du balancier, ce qui fait qu'en réalité la tige du piston est articulée à un axe horizontal reliant le double point D.

§ V — Les Régulateurs

On voit, en suivant la figure 283, que, sur l'arbre moteur mû par le système de bielle et de manivelle décrit plus haut, est montée une grande roue V, le plus souvent de fonte, à laquelle on donne le nom de *volant*. Cette pièce, qui se trouve dans toutes les machines motrices, a pour objet de régulariser le mouvement.

Dans une machine motrice telle que la machine à vapeur, la vitesse est sujette à éprouver des variations qui peuvent dépendre, soit de la force motrice elle-même, c'est-à-dire de la vapeur qui sort du générateur plus ou moins abondante et douée d'une pression plus ou moins considérable, soit de l'emploi de la force dans l'usine où la machine est établie. On comprend qu'il y ait intérêt à ce que ces variations soient renfermées dans des limites restreintes : on y parvient de diverses manières, et, en premier lieu, par l'emploi des volants qui augmentent la masse des parties mobiles de la machine. Lorsqu'il y a excédant de vitesse, la masse du volant absorbe l'excès de travail moteur sous forme de force vive, qu'elle restitue, quand le mouvement se ralentit, aux diverses pièces de la machine. On donne à la fois au volant un grand poids et un grand diamètre, et la plus grande partie de sa masse se trouve répartie dans l'anneau qui en forme la circonférence.

Les dimensions et les poids des volants se calculent en tenant compte à la fois de la puissance de la machine, et de l'irrégularité plus ou moins grande du travail moteur et du travail résistant.

L'emploi d'un volant, pour régulariser le mouvement d'une machine à vapeur, ne remplit son objet qu'autant que la vitesse est tantôt supérieure, tantôt inférieure à la vitesse normale. Mais s'il y avait lieu de craindre que cette vitesse ne fût toujours

en excès ou toujours en défaut, le volant n'y pourrait rien, attendu qu'il acquerrait lui-même une vitesse trop grande ou trop petite, et cet excès pourrait, dans le premier cas, aller en augmentant jusqu'à la rupture. La force centrifuge, qui croît avec le carré de la vitesse, serait la cause de cet accident, que prévient l'usage d'un autre genre de régulateur.

Je veux parler du *régulateur à force centrifuge*, à l'aide duquel la machine règle d'elle-même sa vitesse quand la vapeur afflue de la chaudière avec surabondance ou excès de pression, ou quand la vapeur, n'arrivant pas en quantité suffisante, la vitesse du moteur se ralentit.

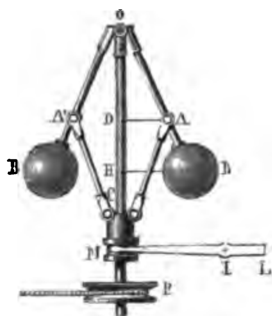


Fig. 282. — Régulateur de Watt, à force centrifuge.

Cet appareil se compose de deux boules métalliques B, B, supportées par deux tiges OA, OA′, articulées autour du point fixe O appartenant à un axe vertical. Deux autres tiges, articulées en A et A′, sont liées à un manchon ou collet M, qui embrasse l'axe vertical et s'élève ou s'abaisse le long de cet axe. Tout le système reçoit d'ailleurs, par l'intermédiaire d'une poulie P, un mouvement de rotation emprunté à l'arbre moteur de la machine. Enfin, le manchon M est embrassé par une fourchette formant une extrémité d'un des bras du levier IL.

Quand la machine fonctionne avec sa vitesse réglementaire, le levier MIL reste horizontal. Si la vitesse s'accélère, la force centrifuge éloigne les boules de l'axe, le manchon s'élève, et avec lui le bras du levier IM; l'autre bras, IL, s'abaisse en tournant autour du point I. Si, au contraire, la vitesse se ralentit, la force centrifuge diminue, et les boules se rapprochent de l'axe, ce qui fait abaisser le manchon et produit un mouvement opposé du levier.

Or le levier communique avec une valve du tuyau amenant la vapeur de la chaudière, de telle façon que la valve se ferme progressivement dans le premier cas, et s'ouvre davantage dans

le second. L'afflux de la vapeur se trouve donc diminué quand la vitesse de la machine dépasse la limite normale; elle est introduite, au contraire, avec plus d'abondance, s'il y a eu ralentissement.

On emploie encore deux autres systèmes de régulateurs, dont la disposition est un peu différente de celle du *régulateur à force centrifuge* (on connaît aussi ce dernier sous les noms de *modérateur de Watt* ou de *pendule conique*). Tous deux sont, comme le premier, fondés sur l'action de la force centrifuge appliquée à des masses qui tournent avec un axe mis en mouvement par la machine. Mais le pendule conique a l'inconvénient que les régulateurs Farcot et Flaud n'ont pas, de régler, avec la vitesse de régime, la puissance de la machine, tandis que ceux-ci permettent de faire varier cette puissance, sans que la vitesse de régime varie sensiblement, ce qui est quelquefois utile dans certaines industries.

CHAPITRE VII

DIVERS TYPES DE MACHINES A VAPEUR

---

§ I — Machine a balancier de Watt

Revenons maintenant au mécanisme de transmission, et faisons voir comment le mouvement, soit du balancier, soit de l'arbre moteur, est utilisé pour le fonctionnement du tiroir, des pompes d'alimentation et d'épuisement.

Sur l'arbre moteur de la machine est calé un *excentrique*, qu'on voit en *dd* sur la figure 283, et dont la fonction est de produire le mouvement alternatif du tiroir. Voici, en deux mots, comment s'obtient ce résultat. L'excentrique est formé d'une pièce métallique circulaire traversée par l'arbre en un point qui n'est pas son centre. Son mouvement de rotation entraîne celui d'un collet ou bride portant un long triangle métallique. Mais l'extrémité de ce dernier s'accroche à l'une des branches d'un levier coudé, dont l'autre branche porte la tringle du tiroir. Le mouvement d'oscillation du levier produit par la rotation de l'excentrique donne lieu à un mouvement alternatif vertical de la tige, et le tiroir fonctionne comme nous l'avons montré plus haut.

La figure 283 représente la machine à vapeur à balancier, telle qu'elle est sortie des mains de Watt, avec tous les perfectionnements que cet illustre mécanicien y a successivement apportés ; elle permettra au lecteur de saisir l'ensemble des divers mécanismes que nous avons dû décrire en détail et séparément, la distribution comme la transmission. Elle va nous

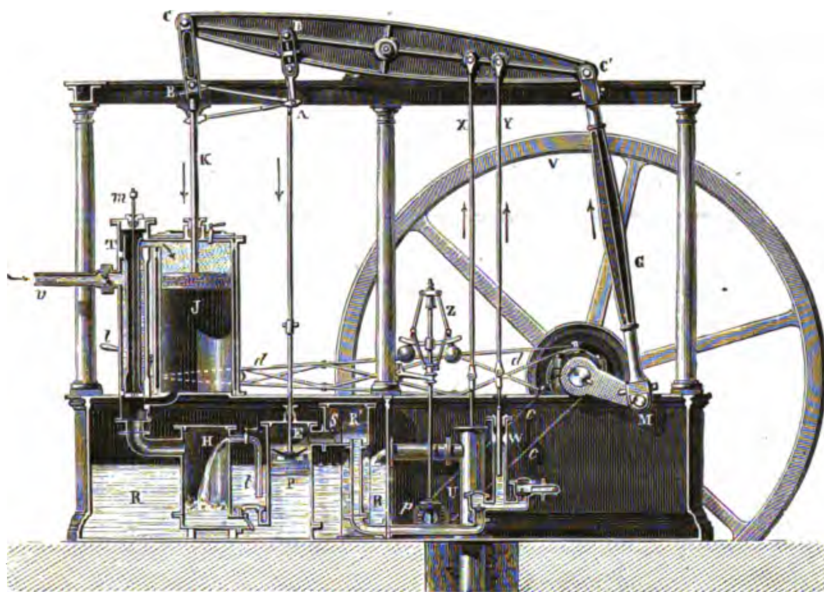


FIG. 283. — Machine à balancier de Watt.

v. Tuyau de prise de vapeur. — T. Tiroir. — J. Cylindre. — H. Condenseur. — PE. Pompe d'épuisement. — WY. Pompe alimen'aire de la chaudière. — UX. Pompe d'alimentation de la bâche R. — *pZ*. Régulateur. — *dd*. Excentrique. ABCD. Parallélogramme. — GM. Bielle et manivelle. — V. Volant.

montrer en même temps comment fonctionnent les diverses pompes dont il a été question dans notre description de la machine. H est le condenseur qui baigne dans une bâche d'eau froide RR, et qui reçoit l'eau de cette bâche par un tuyau *t*. Comme la condensation de la vapeur ne peut se faire sans que celle-ci cède à l'eau la chaleur qui la maintient à l'état gazéiforme, l'eau du condenseur s'échauffe constamment, et il importe de la remplacer, constamment aussi, par de nouvelle

eau froide. De là, la nécessité d'une pompe d'épuisement E, qui est mue par la tige EA reliée au balancier; cette pompe refoule l'eau extraite et chaude dans une capacité R', et c'est là qu'agit à son tour la pompe alimentaire W, pour puiser l'eau et la refouler dans la chaudière. Y est la tige de cette pompe qui reçoit son mouvement du balancier.

Enfin on voit, en XX, la tige de la pompe U, qui sert à alimenter d'eau froide la bâche RR. Cette pompe, ordinairement plus puissante que les deux autres, va chercher l'eau d'alimentation à une source voisine, fontaine, puits ou rivière.

Cette complication d'organes, d'appareils accessoires, qui, du reste, empruntent tous leurs mouvements de la machine à vapeur, n'existe que dans les machines à condensation, c'est-à-dire à basse ou à moyenne pression. Dans les machines à haute pression, fixes ou mobiles, le condenseur, les pompes d'épuisement et tous les mécanismes qui s'y rapportent sont supprimés. Il n'y a plus que la pompe d'alimentation. Mais nous avons pris pour modèle précisément la machine à vapeur la plus compliquée, afin de ne rien oublier d'essentiel pour l'explication des mécanismes employés dans les différents types.

§ II — Machines a vapeur a transmission directe

La transmission du mouvement dans les machines à balancier se fait indirectement, puisque le mouvement du piston devient circulaire alternatif avant de devenir continu.

On a imaginé plusieurs moyens de transmettre directement le mouvement du piston à l'arbre de couche. De là les machines *verticales*, *horizontales*, *oscillantes*. Je vais donner un modèle de chacun de ces genres de machines.

La *machine verticale*, ou à *cylindre vertical*, que représente sous ses deux faces la figure 284, est une machine à haute pression, dans laquelle la vapeur agit avec détente, mais sans con-

densation. La légende montre quels sont les divers organes, cylindre, tiroir, volant, régulateur ou pendule conique, etc. Le seul point sur lequel je dois attirer l'attention est le mode de transmission du mouvement.

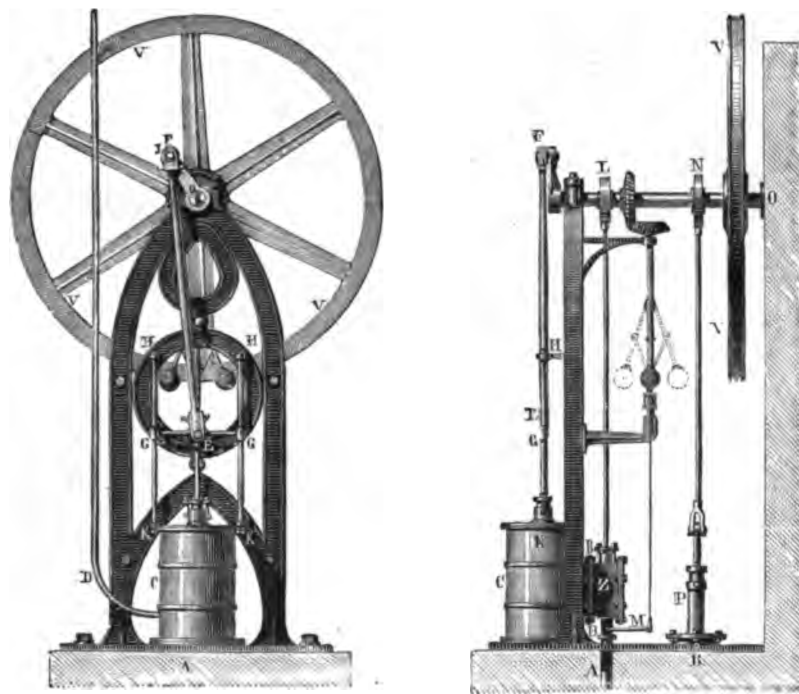


FIG. 284. — Machine à vapeur verticale.

A. Tuyau de prise de vapeur. — C. Cylindre. — B,Z. Tiroir et boîte à vapeur. — GKH. Glissière. — E,F,J,O. Bielle, manivelle et arbre moteur. — VV. Volant. — PO. Pompe alimentaire. — D. Tuyau d'échappement.

La tige du piston est directement articulée à la bielle EF, qui agit sur la manivelle de l'arbre moteur. Cette tige est guidée dans son mouvement par une glissière, pièce horizontale mobile GG, qui se meut le long de deux montants verticaux fixés en K et H, c'est-à-dire, d'une part au cylindre, de l'autre au bâti de fonte de la machine.

C'est, à la vérité, un mode de transmission tout semblable, que celui de la *machine à cylindre horizontal* représentée par

la figure 285. Nous en avons dit assez pour faire comprendre, sans description spéciale, la disposition des organes de cette machine.

Dans les locomotives, nous verrons employer tantôt les cylindres horizontaux, tantôt les cylindres inclinés; les raisons pour lesquelles on préfère telle ou telle de ces dispositions, qui n'ont rien d'essentiel, sont en rapport, soit avec la construction

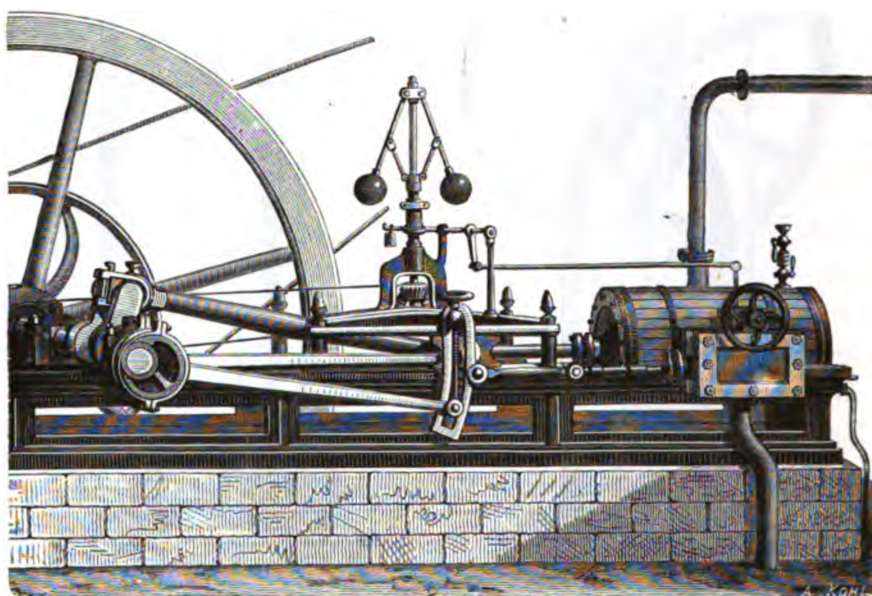


FIG. 285. — Machine à vapeur horizontale.

et l'agencement général des organes de la machine, soit, pour les machines fixes, avec des questions d'emplacement en surface, en hauteur, etc.

Dans les *machines à fourreau*, la tige du piston est ellemême supprimée et la bielle est directement articulée au piston lui-même. Le mouvement oscillant de cette bielle se fait dans un manchon ou fourreau cylindrique traversant le cylindre et que le piston enveloppe complétement. Cette disposition diminue la surface du piston recevant l'action de la vapeur; il faut donc compenser cette diminution par un accroissement du diamètre

du cylindre. L'inconvénient de ce mécanisme très-simple est aisé à comprendre : d'une part, la vapeur se refroidit plus promptement, puisque la surface refroidissante y est plus considérable ; d'autre part, les fuites s'y produisent plus facilement, soit autour du manchon, soit par les rainures qui permettent le mouvement du piston.

Fig. 286. — Machine à vapeur à cylindre oscillant.

Ce mode de transmission est principalement adopté dans les machines marines anglaises.

Un fabricant français, M. Carré, a imaginé et construit le

premier les *machines à cylindre oscillant*, où la transmission se fait sans bielle, la tige du piston étant elle-même articulée directement à la manivelle de l'arbre moteur.

Le cylindre des machines oscillantes (fig. 286) est porté par des tourillons comme une pièce d'artillerie sur son affût. Seulement les tourillons y sont creux et servent, l'un de lumière d'admission pour la vapeur, l'autre d'échappement. D'ailleurs la distribution y est réglée par un tiroir comme dans les machines ordinaires. On distingue les machines oscillantes en *horizontales* et en *verticales*, suivant la direction moyenne du cylindre dans ses oscillations successives.

Ce genre de machines est aujourd'hui à peu près abandonné par l'industrie, sauf dans la navigation, où l'on rencontre souvent encore les machines à deux cylindres oscillants, sur les petits bateaux à vapeur.

§ III — Machines a vapeur rotatives

Il nous reste encore, avant d'étudier les machines à vapeur au point de vue des types, à parler d'une espèce de machine qui se distingue de toutes celles que nous avons passées en revue jusqu'ici par le principe même du mécanisme. Je veux parler des *machines à vapeur rotatives*, ainsi nommées parce que la pièce sur laquelle la vapeur agit directement, celle qui correspond au piston des machines à cylindre, reçoit un mouvement qui est immédiatement circulaire et continu. Le problème de la transformation du mouvement n'existe donc pas dans ces machines.

L'idée de résoudre de cette façon la question des moteurs à vapeur n'est pas nouvelle. Elle était venue à Watt dès 1782; mais les inconvénients de cette disposition n'ont pas permis à la grande industrie de donner suite aux essais tentés dans cette voie : aujourd'hui même, malgré les perfectionnements apportés

à la construction des machines rotatives, ce n'est que dans des cas très-spéciaux que l'industrie en fait usage.

Nous ne ferons que citer la *machine rotative à disque*, ima-

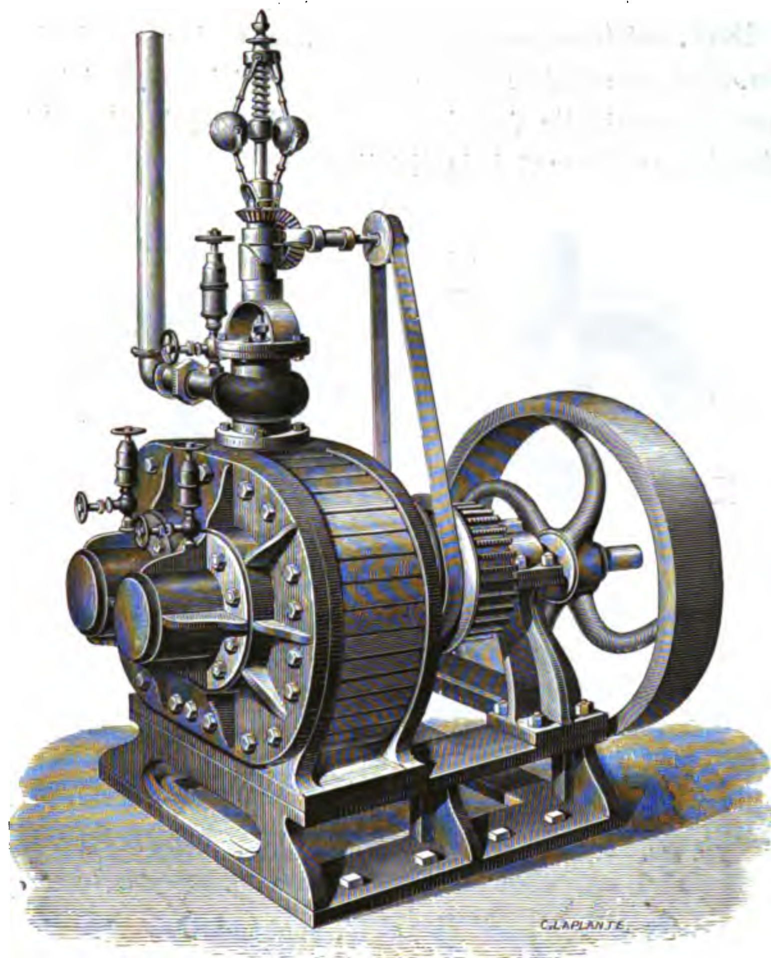


Fig. 287. — Machine rotatoire de Behrens.

ginée par Bishope et construite par Rennie [1]. L'intelligence du mécanisme, très-ingénieux, mais d'une description difficile à suivre, même à l'aide d'une figure, nécessiterait de trop longs développements. Disons seulement qu'elle a été adoptée, dans la

1. Voyez à ce sujet le *Dictionnaire des mathématiques appliquées* de Sonnet.

marine russe, pour des canonnières et de petits bâteaux à vapeur à hélice.

La machine à vapeur rotative de l'Américain Behrens, que nous avons vue fonctionner à Paris, à l'Exposition universelle de 1867, est beaucoup plus simple, au moins pour la description. La figure 287 en donne une vue extérieure. Voici maintenant comment elle fonctionne et quelle est la disposition du mécanisme moteur et de la distribution.

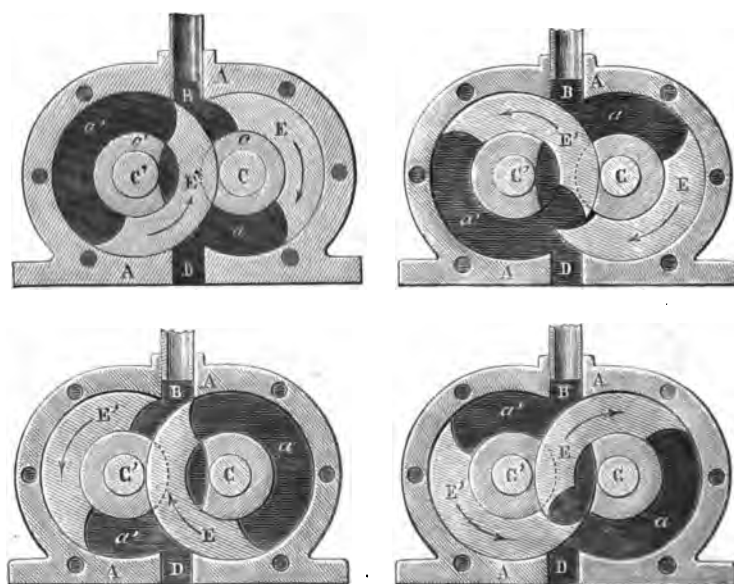


FIG. 288. — Machine rotative : phases d'un mouvement complet de rotation.

Sur deux arbres parallèles C,C', sont montées deux pièces en forme de portions de couronnes, l'une et l'autre concentriques à l'arbre correspondant, et fixées par l'une de leurs extrémités à un épaulement de ce dernier. Ces pièces jouent le rôle du piston des machines ordinaires. Leurs faces extérieures et convexes s'emboîtent dans un cylindre AA parfaitement alésé, et leurs faces inférieures et concaves se meuvent autour de deux douilles c,c', concentriques à l'arbre. La forme des différentes pièces est calculée de telle sorte que chacun des pistons, dans son mouvement, vient s'engager dans une entaille concentrique

à son arbre de rotation, pratiquée dans la douille fixe de l'autre piston. Il résulte de cette disposition que jamais la vapeur ne peut passer entre l'un des pistons et la douille de l'autre.

Voyons maintenant comment agit la vapeur.

Elle arrive par le tuyau d'admission B de la chaudière, pénètre dans l'espace compris entre les deux pistons et la douille *c*. Elle pousse, en s'appuyant sur la face convexe de E′, la face concave du piston E, fait tourner ce piston et son arbre dans le sens marqué par la flèche. Comme les deux arbres portent extérieurement des engrenages destinés à les faire tourner en sens inverse et avec la même vitesse, l'arbre C′ et son piston se meuvent en sens contraire du premier.

Le dessin deuxième et le troisième de la figure 288 montrent la disposition des pièces après un quart, puis après une moitié de révolution. A ce moment, le piston E vient masquer l'ouverture B; la vapeur ne peut plus agir sur ce piston, mais elle commence à agir sur l'autre. Avant que commence le troisième quart de la rotation (phase 4), l'ouverture de la lumière d'échappement D est démasquée, la vapeur de l'espace *a* s'échappe, le piston E continue à être entraîné dans son mouvement par l'autre arbre et par sa vitesse acquise, et ainsi de suite. La vapeur agit donc sur chaque piston pendant un peu plus de la moitié d'un tour, et alternativement chacun des arbres reçoit son mouvement de la vapeur même et de l'autre arbre avec lequel il engrène. L'un des deux arbres est l'arbre moteur de la machine; on le munit d'un volant. La machine rotative de Behrens est, comme on voit, une machine à vapeur sans détente et sans condensation. Mais il est possible, à l'aide d'une valve convenablement disposée, de la faire fonctionner avec détente.

Nous avons signalé déjà (page 48, livre Ier) une des applications originales de cette machine, qui consiste à l'employer comme moteur d'une pompe construite sur le même principe et fonctionnant de la même manière. Aux États-Unis, elle sert dans les brasseries et dans les raffineries, comme pompe élévatoire des liquides, eau, bière, sirops, etc. L'usage en est

peu répandu en Europe, mais il paraît constant que cette machine a une véritable valeur industrielle.

§ IV — Puissance des machines a vapeur

Telle est la machine à vapeur moderne, dans son ensemble et dans les détails principaux de son organisme.

En résumant en quelques lignes la description qui a été l'objet des trois ou quatre chapitres précédents, on voit que la machine à vapeur consiste :

1° En une chaudière ou *générateur à vapeur* qui transforme en force élastique disponible la puissance contenue dans un combustible, la houille par exemple. La chaleur est l'agent de cette transformation ; elle passe du foyer aux parois qui constituent la *surface de chauffe* de la chaudière, et, se communiquant de la fonte à l'eau, elle en élève la température, en provoque et maintient l'ébullition, fournissant d'une façon continue au réservoir de vapeur la masse gazeuse et élastique, à une pression en rapport avec le travail à produire. Foyer, grille, cendrier, carneaux et cheminée, bouilleurs et corps de la chaudière, soupapes et avertisseurs de sûreté, manomètres, indicateurs de niveau et de pression, tel est le *générateur* de la machine, avec ses accessoires.

2° La vapeur produite, la machine proprement dite se compose des organes du mouvement, du récepteur de la force et des appareils de distribution ayant pour objet la production d'un mouvement alternatif rectiligne. Le cylindre, la boîte à vapeur, le tiroir, le condenseur, sont les principaux organes de cette partie de la machine. C'est le *mécanisme moteur*.

Enfin, 3° le mouvement une fois produit sous sa forme immédiate, il s'agit de le transformer, de le rendre apte au travail que l'industrie exige ; et c'est le plus souvent sous forme de mouvement circulaire continu. Les bielles, manivelles, balan-

ciers, glissières, sont les organes ordinairement employés pour cette partie de la machine, à laquelle on réserve le nom de *mécanisme de transmission*. Le volant et les régulateurs ont un objet particulier, qui est de maintenir dans les limites convenables la vitesse de régime ou la puissance du moteur.

Ces différentes fonctions bien comprises, les appareils qui les remplissent bien clairement conçus, au moins dans leurs dispositions principales, on peut, sans craindre de s'égarer, aborder l'examen des différents types de machines qui ont été imaginés depuis l'origine ou l'invention de la vapeur, et dont un grand nombre sont aujourd'hui employés dans l'industrie manufacturière, dans les voies ferrées et la navigation, et enfin dans l'agriculture.

Avant de faire cette revue des types, avant de montrer la vapeur à l'œuvre dans les services multiples qu'elle rend à la civilisation, il faut encore qu'on me permette, non une digression, il s'agit d'une chose essentielle, mais une courte explication de quelques termes et locutions fréquemment employés quand on parle des machines et qu'on évalue leur puissance.

Une machine *à basse pression* est celle où la vapeur possède une tension qui ne dépasse pas *une atmosphère et demie*. Une telle machine possède toujours un condenseur.

Quand la chaudière donne de la vapeur à une tension comprise entre *trois et cinq atmosphères*, la machine est une machine à vapeur *à moyenne pression*. On y adjoint le plus souvent un condenseur, mais cela n'est pas nécessaire.

Enfin, quand la tension de la vapeur dépasse *cinq atmosphères*, auquel cas la machine fonctionne généralement sans condenseur, on a affaire à une machine *à haute pression*.

Mais la puissance d'une machine ne dépend pas seulement de la force élastique de la vapeur qui sert à la mouvoir. Ce n'est là qu'un élément; il faut tenir compte, en partant de cet élément, des dimensions du cylindre, du nombre des coups de piston que la machine donne par minute ou par heure, nombre qui dépend

lui-même de la quantité de vapeur régulièrement fournie par la chaudière. On arrive ainsi à évaluer le travail de la vapeur sur le piston. Mais ce travail, pour être transmis à l'arbre de couche et au volant, est en partie absorbé par les frottements et résistances des organes de transmission, de sorte qu'il y a lieu de le réduire d'après les données de l'expérience pour en conclure le travail réel, la puissance effective de la machine.

Ce travail s'évalue en *chevaux-vapeur*. On dit ainsi d'une machine, qu'elle est une machine de 3, 4, 10, 50, 500 chevaux.

Avant d'aller plus loin, disons donc clairement ce que signifie cette expression de *cheval-vapeur*.

Un effort exercé s'évalue en kilogrammes, ce qui revient à dire qu'on assimile l'effet d'une force à celui d'un poids, par exemple à l'effet qu'un nombre donné de kilogrammes produit sur un ressort. Mais cela ne suffit point pour mesurer le travail effectué par un moteur quelconque, car ce travail dépend encore du temps ou de la vitesse du mouvement produit. Pour achever de le définir, il faut dire quel chemin le moteur fait parcourir au poids pendant l'unité de temps, pendant une seconde.

C'est ainsi qu'on nomme *kilogrammètre* le travail d'une force capable de transporter un kilogramme à une distance d'un mètre en une seconde. Telle est l'unité de travail généralement adoptée par les mécaniciens.

Seulement, dans la pratique, et quand il s'agit du travail des machines, on emploie une autre unité, qui est 75 fois aussi grande que la première, qui vaut donc 75 kilogrammètres, et à laquelle l'usage applique la dénomination de *cheval-vapeur*.

Voici à quelle occasion cet usage s'est introduit.

Quand Watt eut apporté aux premières machines à vapeur les perfectionnements qui les firent adopter dans les mines et dans l'industrie anglaise, les fabricants de ces machines se virent dans l'obligation de garantir à ceux qui leur faisaient des commandes la puissance des nouveaux engins. Dans les mines, on employait généralement des chevaux qui faisaient tourner des manéges. Le travail journalier et moyen de ces

animaux fut pris pour terme de comparaison, et l'estimation, faite expérimentalement par Watt de ce travail, ou *horse-power*, servit à évaluer la puissance des machines livrées. On s'arrêta à un chiffre qui, traduit en mesures métriques, correspondait à 74 ou 76 kilogrammes transportés à 1 mètre. La moyenne, 75 kilogrammètres, a été définitivement adoptée en France, et est aujourd'hui universellement adoptée. Mais qu'on ne s'y trompe point. Le travail de la vapeur est supposé continu, et les machines travaillent des jours et des nuits sans se reposer. Une machine de la puissance d'un cheval fait donc, en un jour, c'est-à-dire en 86 400 secondes, un travail équivalant à 86 400 × 75 ou à 6 480 000 kilogrammètres. Un cheval vivant et réel, au contraire, est dans la nécessité de se reposer; en le faisant travailler huit heures par jour, il ne développerait qu'un travail trois fois inférieur à celui de la même machine.

En réalité, c'est encore là une évaluation trop forte. Les chiffres de Watt, si l'on juge par les expériences faites depuis, s'appliquaient à des chevaux dont la vigueur dépassait la moyenne, et qui probablement étaient surmenés. Il résulte, des expériences auxquelles nous venons de faire allusion, qu'un cheval de force ordinaire, attelé à un manége, allant au pas, développe une force égale à 40 kilogrammètres et demi, ce qui, pour une journée de huit heures, donne 1 166 400 kilogrammètres.

On voit donc, par la comparaison des deux chiffres relatifs au travail de la machine et à celui de l'animal, qu'en réalité, pour remplacer une machine dont la puissance est d'un *cheval-vapeur*, il faudrait employer à faire tourner, sans discontinuité, un manége donnant le même travail, un peu plus de *cinq chevaux et demi*.

Ce qui constitue la puissance d'une chaudière, c'est la quantité ou le poids de vapeur qu'elle est capable de produire en une heure, quand elle est en plein fonctionnement. Or, c'est surtout de la surface de chauffe que dépend cette quantité; de sorte que, toutes choses égales d'ailleurs, c'est le générateur qui offre

au foyer et au gaz de la combustion la plus grande étendue de surface de chauffe, qui est le plus puissant.

Quant à la consommation du charbon, elle est évidemment en rapport avec la surface de chauffe; mais elle varie d'une machine à l'autre, selon le type de la machine, suivant qu'elle est à haute, à basse ou à moyenne pression, suivant enfin qu'elle fonctionne avec ou sans condenseur, avec ou sans détente. Voici à ce sujet quelques données de l'expérience.

La pratique a fait reconnaître qu'il faut compter, pour chaque cheval-vapeur, une surface de chauffe variant entre 1 mètre carré et 1 mètre carré et demi. Une machine à vapeur de la force de 10 chevaux doit donc avoir un générateur ayant entre 10 et 15 mètres carrés de surface de chauffe. La quantité de vapeur produite par heure est alors en moyenne de 20 kilogrammes par cheval, de sorte que la chaudière d'une machine de 10 chevaux doit pouvoir vaporiser par heure 200 kilogrammes, soit environ 200 litres d'eau.

Quant à la consommation de la houille par heure et par cheval, elle varie, avons-nous dit, avec les machines. Les machines de Watt, à basse pression, consomment de 5 à 6 kilogrammes de houille; celles de Woolff, 3 kilogrammes; les machines à haute pression, à détente et sans condenseur, consomment de 4 à 5 kilogrammes par force de cheval et par heure. Ce sont les moins économiques, mais elles rachètent ce défaut par des avantages que nous aurons occasion de signaler plus loin.

Un mot maintenant sur la puissance d'une machine dans son rapport avec les dimensions du cylindre et avec la vitesse du piston, ou, ce qui revient au même, avec le nombre des coups de piston par minute ou par heure.

La pression de la vapeur étant connue par la lecture du manomètre, comment calculera-t-on le travail qu'effectue le piston pendant sa course dans le cylindre? Prenons un exemple qui fera comprendre à la fois la question et la réponse qu'on doit y faire. Supposons une pression de 4 atmosphères dans une

machine à condensation, ou de 5 atmosphères dans une machine dépourvue de condenseur. L'effort exercé par la vapeur sur le piston sera le même en réalité dans les deux cas, puisque dans le second, la pression atmosphérique s'exerce sur la face du piston opposée à celle où s'exerce la force élastique du fluide. C'est donc, sur chaque centimètre carré de la surface, 1033 kilogrammes multiplié par 4, qui mesurera l'effort de la vapeur. Autant la surface du piston contient de centimètres carrés, autant il faudra répéter de fois ce résultat. Mais ceci ne donne pas le travail mécanique, qui sera d'autant plus grand que la longueur du cylindre ou la course du piston sera plus grande. Pour avoir ce travail en kilogrammètres, il faut encore multiplier le résultat précédent par cette longueur, de sorte qu'on peut donner la règle suivante :

Multipliez la surface du piston par sa course exprimée en mètres, par la pression effective de la vapeur et par 1033, et vous aurez le nombre de kilogrammètres qui mesure le travail effectué par le piston dans sa course. Mais la surface multipliée par la longueur du cylindre, c'est le volume de ce dernier.

Ainsi, le travail est proportionnel et à la pression de la vapeur et au volume du cylindre. Supposons, dans le cas que nous prenons pour exemple, le diamètre du cylindré égal à 40 centimètres, sa longueur égale à 40 centimètres, le travail d'une course du piston sera : $\pi.20^2 \times 40 \times 1033 \times 4$, ou $207^{kgm},40$. Un coup de piston se composant de deux courses, ce sera 415 kilogrammètres pour chaque coup.

Ceci ne donne le travail de la machine que pour un va-et-vient du piston, de sorte qu'il faut connaître encore le nombre de ces mouvements par minute ou par heure, pour évaluer définitivement en chevaux-vapeur la puissance de la machine.

Cette vitesse du piston est très-variable. Mais elle ne dépasse guère soixante coups par minute, soit un coup par seconde. S'il s'agissait de cette vitesse maximum, la puissance de la machine serait précisément 415 kilogrammètres par seconde, ou 5,53, un peu plus de 5 chevaux et demi. Supposons quarante-quatre

coups de piston par minute, cela fera en tout 18 278 kilogrammètres, c'est-à-dire 304 kilogrammètres par seconde, ou presque exactement une puissance de 4 chevaux-vapeur.

§ V — Aperçu historique sur la machine a vapeur

Les premières machines à vapeur réellement employées dans l'industrie furent celles de Savery (1696–1698). Le principe en a été donné par Papin, puisque, comme le dit Arago : « Papin est le premier qui ait songé à combiner, dans une même machine à feu, l'action de la force élastique de la vapeur avec la propriété dont cette vapeur jouit, et qu'il a signalée, de se condenser par refroidissement. » Le dessin de la machine élévatoire de Savery, que reproduit la figure 289 dans ses dispositions essentielles, montre que cet ingénieur produisait la vapeur dans un vase séparé B (c'est la chaudière). Le fluide remplissait d'abord le vase S et le tuyau A, dont il chassait l'air. Fermant alors le robinet C, et ouvrant le robinet *e* d'un réservoir plein d'eau froide, il produisait la condensation de la vapeur du vase S; le vide se faisait, et l'eau du réservoir R montait et remplissait en partie le vase et le tuyau. Un jet de vapeur, venant alors de la chaudière et pressant sur la surface du liquide,

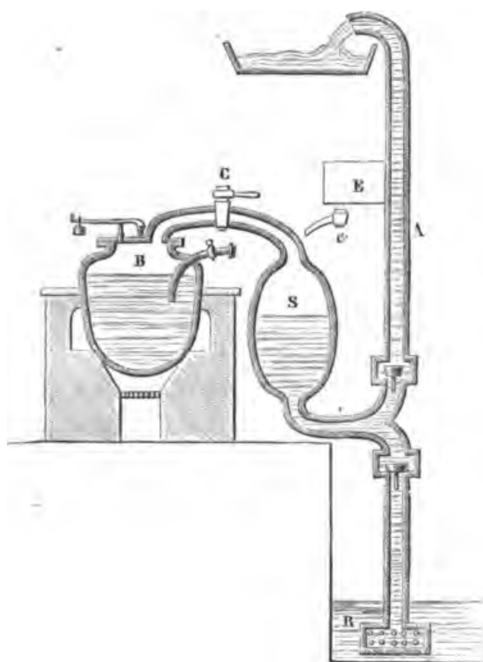


Fig. 289. — Machine à vapeur de Savery.

le forçait à s'élever à une hauteur qui dépendait de la pression. Puis survenait une condensation nouvelle, une nouvelle action de la vapeur, et ainsi indéfiniment.

« Pour élever l'eau à la petite hauteur de 65 mètres (deux cents pieds), par exemple, Savery était forcé, dit Arago, de porter la vapeur de sa chaudière à 6 atmosphères : de là des dérangements continuels dans les joints ; de là aussi la fonte des mastics et même de dangereuses explosions. Aussi, malgré le titre de son ouvrage, *l'Ami du mineur* (*Miner's Friend*), les machines de cet ingénieur ne servirent point utilement dans les mines. Elles ne furent employées que pour distribuer l'eau dans les diverses parties des palais ou des maisons de plaisance, dans des parcs ou dans des jardins, partout, en un mot, où la différence de niveau à franchir ne surpassait pas une quarantaine de pieds. »

La machine de Savery, comme on voit, utilisait la force élastique de la vapeur pour refouler l'eau directement, et la condensation de cette vapeur pour produire le vide et l'ascension de l'eau sous l'action de la pression atmosphérique. C'était une sorte de pompe aspirante et foulante, où l'action de la vapeur jouait le rôle de la force musculaire appliquée au jeu du piston dans le cylindre de ces appareils hydrauliques. Elle n'est donc point comparable à la machine à vapeur moderne, telle que nous la connaissons.

Quatorze ou quinze années après la tentative de Papin, l'ingénieur anglais Savery s'associa à deux de ses compatriotes, Thomas Newcomen et John Cawley, tous les deux vivant dans la ville de Darmouth en Devonshire, où ils exerçaient, le premier la profession de forgeron ou de quincaillier, le second l'état de vitrier. De cette association naquit la machine à vapeur connue sous le nom de Newcomen ou de *machine atmosphérique*.

Disons rapidement quel est, dans cette machine, le mode d'action de la vapeur.

La chaudière fournit de la vapeur à une pression un peu supérieure à la pression atmosphérique. Au moment de la mise

en train, le piston étant à la partie supérieure du cylindre, la vapeur remplit ce dernier, en chasse l'air par un orifice V auquel on donne le nom de *reniflard.* Alors on ouvre le robinet du tuyau LO, et de l'eau froide, injectée dans le cylindre, y condense la vapeur; le robinet fermé, la pression extérieure agit sur le piston et le fait descendre au bas du cylindre.

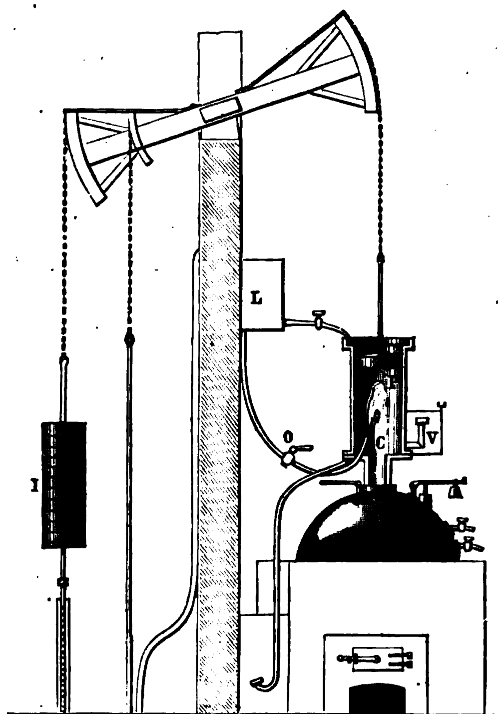


Fig. 290. — Machine à vapeur atmosphérique de Newcomen.

A ce moment, un tiroir débouche la communication du cylindre avec la chaudière, de sorte que la vapeur, en dessous, et la pression atmosphérique au-dessus du piston, se font équilibre. Le piston resterait donc dans cette situation, si un contrepoids I, lié au balancier de la machine, ne le forçait à remonter à la partie supérieure du cylindre. Une nouvelle condensation le fait redescendre, et ainsi de suite : le mouvement de va-et-vient est produit.

On voit maintenant la raison de la dénomination de *machine atmosphérique* donnée à la machine de Newcomen : c'est la pression de l'air extérieur qui est le moteur; la vapeur n'intervient que pour lui faire équilibre pendant l'ascension du piston. Pendant la descente, la condensation de la vapeur produit le vide, et c'est encore la pression de l'air qui fait descendre le piston.

Les machines atmosphériques étaient surtout employées comme machines d'épuisement de l'eau des mines. Elles ont été également appliquées à la distribution des eaux dans la ville de Londres. Malgré les immenses perfectionnements apportés pendant un siècle et demi aux moteurs qui ont la vapeur pour agent, il paraît que les machines de Newcomen étaient il y a quelque temps et sont peut-être aujourd'hui encore employées dans les lieux où la houille coûte peu de chose.

La machine à vapeur, sauf quelques perfectionnements de détail, resta ce que l'avaient faite Newcomen, Savery et Cawley, jusqu'en 1769. Soixante-quatre ans s'écoulèrent donc ainsi, infructueusement pour ainsi dire, jusqu'à ce que le génie de Watt, secondé par les progrès rapides des sciences physiques dans ce demi-siècle, en fit le puissant moteur, l'incomparable engin dont nous avons donné la description, en choisissant précisément pour type la machine à balancier, qui porte encore aujourd'hui le nom de Watt.

§ VI — Watt et la Machine a vapeur

On vient de voir que les machines de Newcomen étaient de simples pompes, d'excellents engins à la vérité pour épuiser l'eau des mines, mais non pas de vrais moteurs universels, capables de fournir, pour les besoins d'une usine quelconque, un mouvement régulier et constant. La raison en est simple.

La pression de l'atmosphère qui agit pour produire le mouvement descendant du piston est la vraie force motrice de ces machines, qui n'ont aucune puissance effective pendant la course ascendante : c'est tout ce qu'il fallait pour le jeu des pompes qu'elles faisaient mouvoir; c'eût été un grave inconvénient pour une machine motrice, qui ne doit avoir aucune intermittence d'action.

Les machines atmosphériques étaient donc des machines *à simple effet*. Watt les transforma d'abord en machines *à double effet*. Il supprima l'action de l'atmosphère, et lui substitua, dans les deux phases du mouvement, l'action de la vapeur. Le cylindre ouvert par en haut fut remplacé par le cylindre fermé à ses deux bouts, divisé par le piston en deux capacités distinctes où la vapeur pénètre alternativement et où elle est alternativement condensée.

Ainsi fut créée la vraie machine à vapeur, celle où le fluide élastique est le véritable moteur, cause unique du mouvement. Les oscillations du piston communiquent alors au balancier des oscillations d'égale force, d'égale amplitude. En un mot, avec le double effet, la machine à vapeur devint un moteur universel, applicable à toutes les industries.

D'ailleurs Watt, en universalisant l'emploi de la machine à vapeur, ouvrait par cela même la porte à tous les perfectionnements. Lui-même consacra toutes ses forces, toute son intelligence, à cette tâche si ardue à l'origine. Par l'invention du *gouverneur* (c'est le nom anglais, *governor*, du régulateur à force centrifuge), il réduisit encore les inégalités du mouvement. « L'efficacité du régulateur est telle, dit Arago dans sa Notice biographique sur Watt, qu'on voyait, il y a peu d'années, à Manchester, dans la filature de coton d'un mécanicien de grand talent, M. Lee, une pendule mise en action par la machine à vapeur de l'établissement, et qui marchait sans trop de désavantage à côté d'une pendule ordinaire à ressort. Le régulateur de Watt et un emploi bien entendu des volants, voilà le secret véritable de l'étonnant perfectionnement des produits

industriels de notre époque, voilà ce qui donne aujourd'hui à la machine à vapeur une marche totalement exempte de saccades; voilà pourquoi elle peut, avec le même succès, broder des mousselines et forger des ancres, tisser les étoffes les plus délicates et communiquer un mouvement rapide aux pesantes meules d'un moulin à farine. Ceci explique encore comment Watt avait dit, sans craindre le reproche d'exagération, que pour éviter les allées et les venues des domestiques, il se ferait apporter les tisanes, en cas de maladie, par des engins dépendants de la machine à vapeur. »

L'invention du condenseur séparé, des pompes qui y sont adjointes, fut d'une importance capitale, principalement au point de vue de l'économie. A égalité d'effet, elle réduisit au quart la dépense de combustible des machines de Newcomen. On peut se rendre compte de la valeur des économies réalisées dès le début dans les pays des mines, où les machines d'épuisement fonctionnaient, et depuis dans toutes les usines où la vapeur est employée à basse et à moyenne pression, par le fait suivant, que les historiens de la vapeur ont souvent cité. Trois pompes étaient en activité dans la mine de Chace-Water, dont les propriétaires payaient à Watt et à son associé Bolton une redevance pour le droit de se servir du condenseur. Cette redevance avait été fixée au tiers de la valeur de la houille économisée. Or, les propriétaires de la mine jugèrent avantageux de racheter ces droits par le payement d'une somme annuelle de 60 000 francs. Ainsi, l'adjonction d'un condenseur de Watt produisait par an, pour chacune des machines, une économie de combustible supérieure à 60 000 francs, plus de 180 000 francs pour les trois machines de la mine en question.

L'emploi de la détente, que Watt avait signalé, mais qui n'a été adopté sur une large échelle que depuis l'invention faite par Woolff des machines à deux cylindres, a accru encore l'économie de vapeur, et, par suite, l'économie de combustible, ce *desideratum* poursuivi par tous ceux qui travaillent à perfectionner la machine à vapeur. A l'origine, on ne connaissait que

la détente fixe; aujourd'hui, des mécanismes nouveaux permettent de faire varier la détente.

Pour être juste, il ne faut pas, dans l'histoire des perfectionnements de la machine à vapeur, se borner à citer le nom de Watt. C'est Keane Fitzgerald (1758) qui s'est le premier servi du volant pour régulariser le mouvement de rotation; l'emploi des bielles et manivelles pour transformer en mouvement de rotation le mouvement rectiligne et oscillatoire de la tige du piston est dû à Washbrough (1778). Enfin, Murray (1801) est l'inventeur du tiroir manœuvré par un excentrique. Du reste, en décrivant les machines à vapeur marines, les locomotives et les locomobiles, je compléterai, autant que possible, cette courte histoire des progrès de la vapeur.

CHAPITRE VIII

LA NAVIGATION A VAPEUR

---

§ I — Les Machines marines

Cent deux années s'écoulent entre la première application véritablement industrielle de la machine à vapeur et l'installation définitive du puissant engin à bord du bateau auquel il sert de moteur, entre Newcomen et Fulton.

Et cependant, ni l'idée première, ni les tentatives d'exécution n'avaient fait défaut.

C'est encore à Papin qu'il faut remonter pour trouver nettement formulée la pensée mère de cette application qui devait, un siècle plus tard, prendre des développements si considérables. Dès 1695 [1], il signale la possibilité d'appliquer la force de la vapeur « à ramer contre le vent »; il fait remarquer « combien cette force serait préférable à celle des galériens pour aller vite en mer »; il songe à substituer aux rames ordinaires « des rames tournantes »; il s'ingénie à trouver un mécanisme pour obtenir le mouvement continu de rotation.

Bien plus, il paraît établi qu'en 1707, Papin avait mis

1. Recueil imprimé à Cassel, extrait des *Acta eruditorum* de Leipzig.

à exécution cette pensée, ce projet d'abord simplement indiqué, et fait construire et installer sur un bateau une machine à vapeur destinée à le mouvoir. Il se serait embarqué à Cassel, sur la rivière Fulda, et, arrivé à Münden (Hanovre), il se proposait de continuer sa route par le Weser jusque dans la Grande-Bretagne, quand les bateliers de ce fleuve, ameutés contre le grand homme et contre l'invention qui leur semblait menacer leur industrie, mirent le bateau et la machine en pièces.

En 1737, un Anglais, J. Hull, proposait de remplacer les rames par deux roues à palettes placées à l'arrière du bâtiment, et de faire tourner leur axe en commun avec une machine de Newcomen. Ce projet ne reçut pas d'exécution.

C'est à Paris, sur la Seine, vis-à-vis du Champ de Mars, qu'eut lieu, après celle de Papin, la première expérience de navigation à vapeur. Le bateau avait été construit par le comte d'Auxiron. Un an après, en 1775, un savant qui devint membre de l'Académie des sciences, Périer, fit sans plus de succès des expériences semblables.

De nouveaux essais, de plus en plus heureux, se succédèrent jusqu'à la fin du siècle. En 1778, le marquis de Jouffroy expérimenta un bateau à vapeur à Baume-les-Dames, sur le Doubs, puis, trois ans plus tard, à Lyon, sur la Saône. Dans cette dernière tentative, qui fut l'objet d'un rapport très-favorable, il s'agissait d'un bateau de 46 mètres de longueur sur 4 mètres et demi de largeur; une machine à vapeur atmosphérique communiquait d'abord le mouvement à deux sortes de volets se fermant et s'ouvrant alternativement, et qui furent ensuite remplacés par deux roues à aubes.

Il faut citer encore, parmi ceux qui ont contribué à réaliser l'invention et l'idée de Papin, Patrick Miller, qui publia à Édimbourg (1787) un ouvrage sur la substitution des roues à palettes aux rames, et sur la possibilité d'employer la machine à vapeur à leur donner le mouvement. Miller fit plus tard l'essai d'un bateau double muni d'une roue au milieu, et le fit, dit-on, naviguer sur les lacs de la Suisse, en 1789.

L'abbé Darnal en France (1781), les Américains Rumsay et Fish (1786-1788), les Anglais lord Stanhope (1795), Baldwin (1796), Livingstone (1798), Desblancs, Smington, Stevins, Olivier Evans, ont également fait des essais de navigation à vapeur, qui se multiplièrent du reste de plus en plus en Europe et en Amérique, jusqu'à l'époque où l'Américain Fulton put enfin obtenir une réussite complète.

Fulton avait, dès 1802 et 1803, étudié en France les conditions pratiques du problème à résoudre, et il avait été secondé dans cette vue par son compatriote Livingstone, alors ambassadeur des États-Unis. Un bateau construit sur la Seine avait donné pour résultat une vitesse de $1^{m},60$ par seconde.

Fulton fit au gouvernement de Bonaparte des propositions qui ne furent point accueillies, et dont le rejet le décida à retourner en Amérique. Il se fit construire et expédier, par Watt et Bolton, une machine à vapeur qui, mise en place en août 1807, sur le bateau *le Clermont*, fournit enfin la solution pratique et définitive du problème de la navigation à vapeur. Le voyage de New-York à Albany, dont la distance est de 60 lieues, fut, dès le début, accompli en 32 heures, puis en 30 heures, et un service régulier ne tarda point à s'établir entre ces deux villes. La navigation à vapeur était décidément passée de l'état d'ébauche à l'état de fait accompli, de la période des tâtonnements et des essais à celle du succès et du triomphe. Il y a de cela soixante-six ans sonnés.

Aujourd'hui, la distance est grande entre le bateau de Fulton et les grands steamers transatlantiques qui voyagent régulièrement du nouveau à l'ancien monde. Les progrès de la navigation à vapeur pendant ces deux tiers de siècle ont été immenses : mais il ne faut point oublier la part qui revient à chacun des inventeurs qui ont travaillé sans se décourager à cette découverte mémorable, depuis le modeste Papin jusqu'à Fulton.

§ II — Les Bateaux et Navires a vapeur a aubes

Quand la vapeur fut découverte, il y avait longtemps que l'idée de remplacer les rames des bateaux par des roues que ferait tourner l'action musculaire des animaux ou de l'homme avait été conçue et même essayée. Les Romains et les Carthaginois s'étaient déjà servis de bateaux mus par des roues à aubes. D'anciennes médailles représentaient des *liburnes* (navires employés par les Romains à Actium) portant sur les côtés trois paires de roues à palettes tournées par trois paires de bœufs. Je lis dans l'*Art naval*[1] que « l'on trouve en Chine, où elles sont en usage depuis des temps immémoriaux, des jonques à quatre roues, dont le moteur est une ingénieuse manivelle mise en mouvement par des hommes ». En 1472, Valturius de Rimini décrivait une roue dont l'arbre était mû, au moyen de manivelles coudées, par des hommes, et dont les palettes remplaçaient les rames. Un propulseur semblable était proposé, en 1699, par du Quet, à l'Académie des sciences de Paris. Quand, quelques années plus tôt, Papin propose d'appliquer la vapeur aux bateaux, il fait mention des roues à rames de la chaloupe du prince palatin Rupertus, qu'il avait vues en 1678 en Angleterre : ces roues étaient mues par des chevaux attelés à un manége.

Ce mode de propulsion ne devait être sérieusement adopté qu'après la découverte et l'application d'un moteur puissant : on vient de voir que ce moteur est la vapeur. Ce n'est donc que depuis Fulton que les rivières, les lacs et la mer sont sillonnés de navires et de bateaux armés de roues à aubes.

Tout le monde sait ce que c'est qu'une roue à aubes : ceux

1. *Bibliothèque des merveilles.*

qui n'ont pas vu de bateaux à vapeur ont pu observer des roues analogues dans les moulins de nos rivières.

Les *aubes*, *palettes* ou *pales*, qui rayonnent tout autour de l'axe, reliées solidement à celui-ci par des tiges ou jantes de fer (voy. plus loin la figure 296), sont des lames rectangulaires qui, mises en mouvement par la rotation de l'arbre moteur, viennent successivement plonger dans l'eau, et, s'appuyant sur la masse liquide, font avancer le bateau en sens contraire de leur propre mouvement. Les roues sont toujours, pour la symétrie et l'équilibre, au nombre de deux; elles sont montées sur le même arbre ou axe, qui traverse le navire perpendiculairement à sa longueur; et quand elles plongent dans l'eau verticalement, leur bord supérieur doit être recouvert par le fluide d'une hauteur de $0^m,10$ à $0^m,20$.

Il en est du travail mécanique des aubes sur l'eau comme de celui des rames; il ne produit un effet utile, c'est-à-dire la propulsion du bateau en avant, que parce qu'il donne lieu à un mouvement de l'eau en arrière; ce dernier mouvement, sans lequel le premier, qui en est la réaction, n'existerait pas, se nomme le *recul;* il absorbe une quantité considérable du travail de la vapeur, indépendamment des pertes occasionnées par le frottement. Comme exemple de cette répartition du travail moteur, nous citerons celui que donne M. Sonnet[1]; il est déduit d'expériences faites sur le bateau à vapeur *le Castor*, qui fait le service de Honfleur au Havre. « Sur 100 chevaux-vapeur fournis par la machine, dit-il, il y en a 33,9 employés à vaincre la résistance de l'eau sur la carène, c'est ce qui constitue le travail utile; 58,2 sont consommés par le recul, c'est-à-dire pour mettre l'eau en mouvement; le frottement n'en emploie que 7,9.

Le choc successif des palettes sur le liquide, à leur entrée et à leur sortie, produit sur le navire une suite de trépidations gênantes et fatigantes, qu'on réduit beaucoup en donnant aux

1. *Dictionnaire des mathématiques appliquées.*

palettes, dans le sens de leur longueur, une inclinaison légère. Alors, une extrémité plonge avant l'autre, ou, si l'on veut, l'immersion est successive sur toute la longueur de la palette. Par ce moyen, le choc et les trépidations qui en sont la conséquence sont presque insensibles.

Sur les eaux dont la surface n'est point agitée, où les bateaux peuvent conserver une position presque horizontale d'équilibre, les roues à aubes font un service excellent. Mais il n'en est pas de même sur mer, où l'action du roulis fait pencher le navire de droite à gauche, et où cette inclinaison empêche l'axe des roues de rester horizontal. Les deux roues plongent alors inégalement dans l'eau, de sorte que l'action de chacune d'elles sur le liquide et sur le mouvement de propulsion devient inégale. Il en résulte, pour la direction du navire, une déviation fâcheuse et aussi une perte de force et de vitesse. Je parle ici du principal inconvénient des roues à aubes, de celui qui affecte la marche des navires de toutes sortes. Mais, dans la marine militaire, les roues à aubes offrent un inconvénient plus grave encore : elles réduisent la puissance offensive en prenant une place que l'artillerie réclame; elles réduisent la puissance défensive en exposant le propulseur et le moteur lui-même au feu de l'ennemi.

Il est résulté de là que la transformation de la marine militaire à voiles en marine à vapeur a été retardée, jusqu'au moment où l'invention d'un propulseur nouveau, qui n'est sujet à aucun des deux inconvénients que je viens de signaler, rendit possible une large application de la vapeur aux flottes de guerre. Ce nouveau propulseur est l'*hélice*, qui, comme les roues à aubes, la vapeur même, et beaucoup d'autres inventions mécaniques ou physiques, etc., a été l'objet d'une série assez nombreuse d'essais et de tâtonnements avant d'obtenir la véritable et décisive consécration du succès, la réalisation industrielle ou pratique.

§ III — Les Bateaux et Navires a vapeur a hélice

L'hélice n'est autre chose qu'une vis ou qu'un fragment de vis, laquelle faisant corps avec le bateau, avance dans l'eau et entraîne celui-ci dans l'écrou mobile que constitue le fluide lui-même. Le mouvement de rotation des spires autour de l'axe du propulseur est produit par une machine à vapeur installée à bord du navire.



Fig. 291. — Cadre de l'hélice à l'arrière du navire.

Tout ce que nous avons dit de l'action propulsive des roues à aubes est applicable à l'hélice. C'est aussi en s'appuyant sur l'eau, masse mobile, et en lui imprimant un mouvement en sens contraire de celui de la marche du bateau, que ce dernier mouvement se produit. Il est donc inévitable qu'il y ait une fraction notable du travail moteur perdue en pure perte. Les avantages de l'hélice comparée aux roues à aubes sont d'une autre nature, mentionnons-les rapidement.

L'hélice est placée à l'arrière du navire, dans un cadre rectangulaire qui s'ouvre près de l'étambot (fig. 291). L'axe ou arbre moteur qui la porte est parallèle à la quille; il s'appuie par un bout contre la *butée*, sorte de massif solidement établi dans la cale; à l'arrière, il traverse la coque dans une boîte à étoupe. La machine met cet arbre et l'hélice en mouvement, soit directement par des manivelles ou coudes, soit indirectement par un engrenage.

Ce propulseur se trouve donc toujours immergé et à une profondeur telle, que les mouvements perturbateurs de la mer

n'ont sur lui aucune action. Il n'est donc pas, comme les roues à aubes, sujet aux inégalités d'action de ces dernières. D'autre part, l'hélice est à peu près complétement à l'abri des projectiles, et il en est de même des machines qui la font mouvoir, puisqu'elles sont installées, comme l'hélice, dans les parties inférieures du navire. Enfin, et ces considérations ont surtout de l'intérêt pour la marine de guerre à vapeur, les batteries d'artillerie ne se trouvent nullement gênées par son installation.

En général, l'hélice offre sur les roues à aubes cette autre supériorité, que son installation laisse entièrement libre la manœuvre de la voile, de sorte que les navires à vapeur à hélice peuvent être gréés pour marcher sous l'action du vent quand ce dernier est favorable, ce qui est économiquement fort avantageux. Les navires mixtes, à voiles et à aubes, sont au contraire d'une manœuvre plus difficile.

En quelques lignes rapides traçons l'histoire de l'invention de l'hélice ou de son application à la navigation à vapeur.

Comme pour la roue à aubes, il a d'abord été question de faire mouvoir l'hélice par les moteurs animés, l'homme ou les animaux. Duquest (1727) utilisait le courant des fleuves pour remorquer les bateaux en se servant de la vis d'Archimède. Paucton (1768) employait une hélicoïde à quatre branches à laquelle il imprimait le mouvement par la puissance motrice des hommes d'équipage.

En 1803, l'ingénieur Dallery prit un brevet pour un propulseur mû par la vapeur et composé de deux vis : l'une à axe mobile, placée à l'avant, servait de gouvernail ; l'autre, placée à l'arrière, venait ajouter son impulsion à celle de la précédente, d'où résultait la progression du navire. Les noms des Anglais Shorter (1802), Samuel Brown (1825), du capitaine du génie français Delisle (1823), des frères Bourdon, de Sauvage (1832), doivent être cités au nombre de ceux qui ont conçu des projets ou fait des essais pour l'application de l'hélice à la propulsion des navires.

Deux hommes, le mécanicien anglais Smith, d'abord simple fermier, et l'ingénieur suédois Ericson, peuvent être considérés comme ayant définitivement et presque simultanément résolu le problème.

L'*Archimède*, navire à vapeur de 90 chevaux, est le premier bâtiment qui ait navigué, sous l'action d'un propulseur hélicoïde du système de Smith, en 1838. Quatre ans plus tard, le *Princeton*, de 220 chevaux, muni d'une hélice système Ericson, était lancé aux États-Unis.

Le premiers essais du Suédois Ericson eurent lieu en Angleterre en 1837. Un navire, le *Francis B. Odgen*, muni de son propulseur, remorqua un schooner de 140 tonneaux avec une vitesse de 7 milles à l'heure. Mais Ericson, n'ayant reçu des Anglais aucun encouragement, passa aux États-Unis, où son invention fut accueillie avec l'enthousiasme qu'elle méritait. Il s'était, avant son départ, entendu avec Stockton, officier de la marine des États-Unis, et c'est sur le *Robert Stockton*, navire à vapeur à hélice de 70 chevaux, qu'ils firent ensemble la traversée de l'Océan, et débarquèrent sur les côtes de la grande république. Le *Princeton* suivit de près ce premier navire construit en Angleterre.

La France suivit, dès 1842, l'exemple donné par les deux grandes puissances maritimes. Un navire de 130 chevaux, pourvu d'une hélice système Ericson, fut construit au Havre.

Depuis, la transformation des flottes en navires à vapeur à hélice fit dans le monde entier de grands progrès. Les navires de commerce, les paquebots, suivirent l'exemple, sans toutefois que le système propulseur à aubes, qui a aussi ses avantages, ait été abandonné. Ce n'est pas ici le lieu de faire l'histoire de ces changements. Revenons donc à la description des systèmes d'hélices adoptés, pour reprendre ensuite celle des machines à vapeur marines, qui doit nous intéresser particulièrement.

Les premières hélices de Smith étaient formées d'un pas entier dans le sens de l'axe; plus tard il réduisit l'hélice à un

demi-pas, mais il la doubla (fig. 292). L'expérience fit bientôt voir que l'étendue des spires dans le sens de l'axe pouvait et devait être considérablement réduite. On emploie donc des fractions de pas beaucoup plus petites, et l'on multiplie les branches



FIG. 292. — Premières hélices de Smith : hélice simple d'un pas entier; hélice double d'un demi-pas.

ou ailes du propulseur, qui, le plus souvent cependant, sont réduites à quatre, quelquefois à deux (fig. 293). L'emploi des hélices à six ailes ou plus offre plus d'inconvénients que d'avantages, l'action des unes nuisant à l'action des autres. C'est

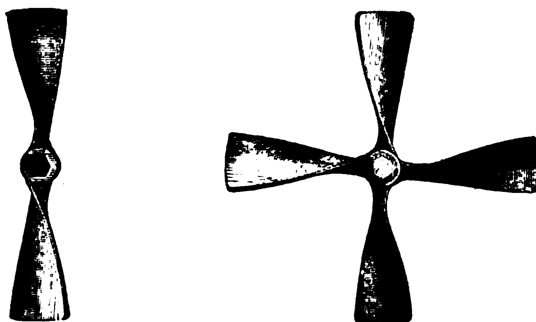


FIG. 293. — Hélices à deux et à quatre ailes.

l'étendue ou le diamètre des ailes de l'hélice, c'est aussi la rapidité du mouvement de rotation, qui donnent à ce propulseur toute sa puissance.

Nous avons vu comment est disposée l'hélice dans son cadre, à l'arrière d'un navire; ajoutons que, pour éviter la résistance qu'offrirait l'hélice au cas où la voile remplace l'action de la vapeur, on s'arrange, soit pour la rendre *folle*, soit pour la retirer momentanément de son cadre. Dans ce dernier cas, un

puits est ménagé dans l'arrière du bâtiment; on soulève l'hélice, qu'on amène, entre deux coulisses, dans le puits, où elle peut être visitée et réparée au besoin.

§ IV — Les Chaudières et les Machines marines

Le propulseur des navires ou des bateaux à vapeur nous est connu. Voyons maintenant comment la vapeur, la seule force motrice assez puissante pour suppléer à la force inconstante et souvent contraire du vent, imprime aux roues ou à l'hélice le mouvement de rotation.

La machine à vapeur, telle que nous l'avons décrite, est-elle modifiée d'une manière essentielle, quand elle devient une machine de navigation?

Non. En réalité, non-seulement le principe est identique, mais les organes principaux, le générateur, le mécanisme moteur, la transmission restent les mêmes. Ils ne font, ainsi qu'on va le voir, que subir les nécessités particulières à l'installation sur un navire.

A l'origine, les machines à basse pression et à condensation, c'est-à-dire les machines de Watt à balancier, les seules d'ailleurs employées alors dans l'industrie, formaient le type des machines de navigation, soit sur les rivières et les lacs, soit sur la mer. Aujourd'hui encore, les vapeurs à aubes trouvent avantage à s'en servir. Les mouvements en sont lents, comme on sait, mais cette lenteur est largement compensée par la régularité du fonctionnement. Elles sont lourdes et encombrantes, il est vrai, mais toutes leurs parties sont aisément accessibles pour la surveillance, l'entretien, et, au besoin, les réparations. C'étaient les machines qu'avaient adoptées les marines militaires d'Angleterre et de France, avant que l'invention de l'hélice eût changé les données du problème. Pour

l'hélice, les machines de ce type donnent un mouvement trop peu rapide de rotation, qu'il serait sans doute aisé de multiplier par les engrenages, mais aux dépens de la force effective des machines ou de leur travail utile.

La condensation est généralement adoptée, non-seulement là où elle est nécessaire, c'est-à-dire dans les machines à basse pression, mais aussi dans les machines marines à moyenne et à haute pression. L'abondance de l'eau rend commode et économique l'emploi des condenseurs.

Les machines à vapeur employées dans la navigation sont les plus puissantes que l'on construise. Il n'est pas rare que leur force effective se mesure par centaines de chevaux-vapeur ; que dis-je? dans certains navires de la marine militaire, il faut compter par milliers. Ajoutons que l'évaluation de la puissance des machines en chevaux-vapeur — ce qu'on appelle leur force nominale — se fait d'une autre façon que pour les machines terrestres. Le *cheval de basse pression*, le *cheval nominal* dans la marine, vaut, non pas seulement 75, mais plus de 100 kilogrammètres, en moyenne 107 kilogrammètres sur l'arbre de couche, 135 kilogrammètres sur les pistons. Cela tient à ce que la perte de travail moteur employé au recul a forcé les constructeurs à exagérer la force en vue de l'effet utile à produire. Aujourd'hui même, les chiffres que nous venons de rapporter sont trop faibles : dans la marine de l'État, le cheval-vapeur *nominal* atteint 300 kilogrammètres.

A ce compte, la frégate à vapeur *le Friedland*, dont la machine a une puissance effective de 4000 chevaux de 75 kilogrammètres, ne doit être portée, pour sa force nominale, qu'à 1000 chevaux.

Pour obtenir une telle puissance, il a fallu employer des générateurs capables de vaporiser des poids d'eau considérables, ayant par suite une grande surface de chauffe.

Aussi emploie-t-on généralement des chaudières tubulaires à retour de flamme, dont les figures 294 et 295 représentent plusieurs types. D'ailleurs, on ne se contente pas d'une

seule chaudière, ni d'un seul foyer, et la quantité de combustible brûlée s'élève à des proportions énormes. Citons quelques chiffres.

L'*Algésiras*, de 900 chevaux, a une machine munie de huit corps de chaudières dont les foyers, quand ils sont allumés tous ensemble, brûlent par heure 4146 kilogrammes de houille.

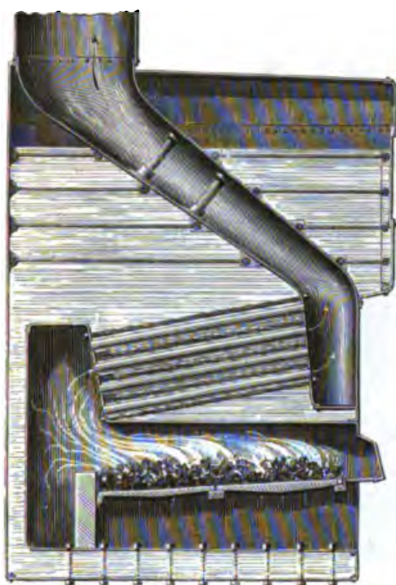


FIG. 294. — Chaudière tubulaire à retour de flamme de l'*Isly* : coupe.

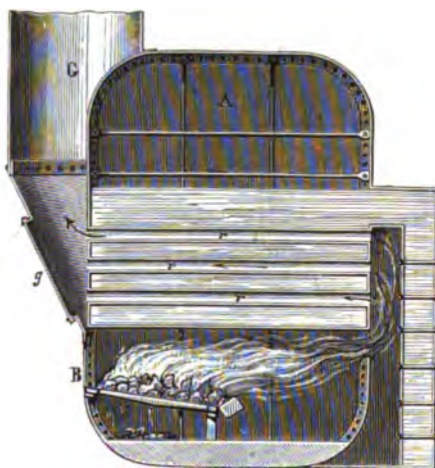


FIG. 295. — Chaudière tubulaire marine à retour de flamme : coupe.

Le *Napoléon*, de 950 chevaux, a aussi huit corps de chaudières, et quarante foyers qui brûlent 3635 kilogrammes de houille à l'heure. La pression de la vapeur n'y dépasse guère 2 atmosphères.

La frégate cuirassée *le Friedland*, qui, avec son chargement complet de charbon et de munitions, pèse 7200 tonnes, consomme, en pleine marche, 5200 kilogrammes de houille par heure, 125 tonnes de houille par jour de navigation continue. C'est donc une dépense qui, suivant les prix de la houille, peut varier de 4000 à 5000 francs par jour pour le combustible seul. L'aspect extérieur des chaudières et des machines marines

ne rappelle guère celui des machines à vapeur employées dans l'industrie manufacturière. Quoique tous les organes en soient de dimensions relativement considérables, on les a disposés de manière à occuper le moins d'espace possible : chaudières, condenseurs, mécanisme moteur, etc., tout est ramassé, comme on peut s'en rendre compte en examinant les deux types de machines dont les figures 296 et 297 donnent l'ensemble général.

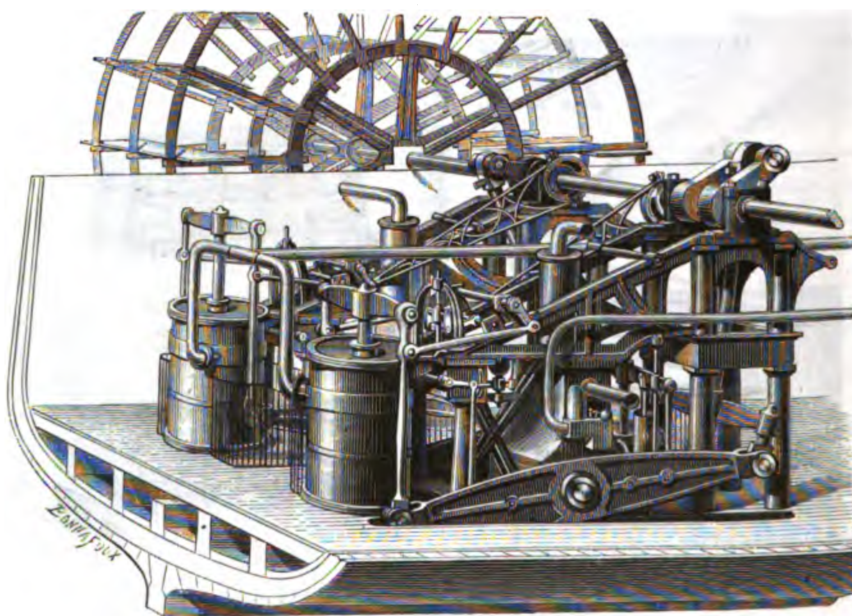


FIG. 296. — Machine à balancier du navire à aubes *le Sphinx*.

La première est une machine à balancier, à moyenne pression, à condensation et à détente. Le balancier se trouve osciller au-dessous du piston et du cylindre : c'est une disposition rendue nécessaire par la situation de l'arbre moteur, de l'axe des roues du navire, qui occupe nécessairement une place élevée dans les navires à aubes. Cette machine appartient au navire à vapeur *le Sphinx*.

Les bielles sont reliées directement à l'arbre, qui est coudé en deux de ses points, de manière à former deux manivelles à angle droit, recevant chacune l'action d'un cylindre.

Ici les cylindres sont verticaux. Quand le même type de machines fut appliqué à l'hélice, les cylindres furent placés horizontalement et dans un sens transversal; mais on fut obligé, pour donner à l'arbre une vitesse de rotation suffisante, d'employer un système d'engrenage. Bientôt on préféra les machines horizontales, à deux cylindres, sans balancier, et c'est sur l'arbre même de l'hélice, coudé à angle droit, que les bielles exercèrent leur action.

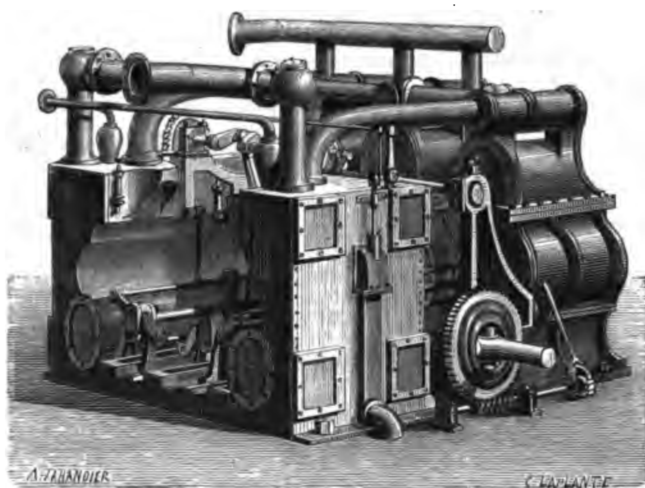


FIG. 297. — Machine marine à deux cylindres de détente et à un cylindre de pleine pression.

Les cylindres des machines marines ont souvent des dimensions colossales. Pour ne citer qu'un exemple, les cylindres de la machine du *Friedland* ont un diamètre intérieur de $2^{m},10$, et la course de leurs pistons n'a pas moins de $1^{m},30$. La pression de la vapeur s'exerce ainsi, pour chaque piston, sur une surface d'environ $3^{m},50$; en supposant la tension de la vapeur de 2 atmosphères et demie, cette pression est donc égale à environ 90 000 kilogrammes.

Pour guider des pistons de cette dimension, on emploie, non plus une seule, mais deux ou quatre tiges qui s'articulent par une traverse à la bielle. Celle-ci revient sur elle-même s'arti-

culer au coude de l'arbre moteur, faisant fonction de manivelle, et, pour cette raison, on la nomme *bielle en retour*.

La machine à vapeur marine que nous venons de citer n'est pas seulement remarquable par ses dimensions, par sa puissance, par la vitesse qu'elle imprime au navire sur lequel elle est installée, vitesse qui n'est pas moindre, par un temps calme, de 14 nœuds et demi, c'est-à-dire d'environ 28 kilomètres à l'heure. Son hélice a $6^{m},10$ de diamètre. Je l'ai vue tourner sur son arbre à l'Exposition universelle de 1867; en se plaçant dans le sens du mouvement des ailes, on ressentait sur la figure l'impression du courant d'air produit par l'évolution des énormes spires. Mais, je le répète, cette machine se distingue aussi comme un type ayant des qualités spéciales. J'en vais dire, pour terminer, quelques mots.

C'est une machine à détente du système de Woolff, avec cette disposition particulière, qu'elle renferme trois cylindres égaux, de même diamètre et de même course. L'introduction de la vapeur a lieu dans un seul cylindre, celui du milieu; après avoir travaillé à pleine pression, elle pénètre dans les deux cylindres latéraux, où elle se détend, puis se rend de là dans deux condenseurs séparés. En sortant des chaudières, la vapeur circule dans un appareil sécheur, puis elle se bifurque dans les chemises-enveloppes des cylindres extrêmes. A puissance égale, à poids égal des machines, on obtient avec ce système, comparé au système à deux cylindres, une économie notable de combustible.

Mais, de plus, comme les coudes ou manivelles de l'arbre moteur qui reçoivent les têtes de bielles sont disposés à angle droit pour les coudes correspondant aux pistons extrêmes, et dans le prolongement de la bissectrice de cet angle pour le coude du milieu, il en résulte cet avantage, que toutes les pièces mobiles conservent presque complétement le même équilibre autour de l'axe de l'arbre, quelle que soit la position du navire déterminée par le roulis.

Les machines à fourreau, les machines oscillantes, que j'ai décrites dans le paragraphe consacré au mécanisme de trans-

mission, sont souvent employées dans la navigation à vapeur fluviale ou maritime. Je crois avoir dit déjà que les premières étaient surtout en usage dans la marine anglaise. En général, les différences qu'on rencontre entre les machines fixes terrestres et les machines marines sont presque toutes dues aux modifications nécessitées par la question d'aménagement et d'emplacement.

CHAPITRE IX

LA LOCOMOTIVE

---

§ I — La Vapeur sur les chemins de fer — Premières Locomotives

Les premiers essais de voitures mues par la vapeur d'eau remontent à l'ingénieur français Cugnot, qui, en 1769, conçut et fit exécuter à Paris un chariot destiné à se mouvoir sur les routes ordinaires, sous l'action de la vapeur. Vint plus tard Olivier Evans, qui construisit à Philadelphie, en 1804, la première voiture de ce genre qu'on ait vue en Amérique. A la même époque, une machine locomotive circula sur le chemin de fer de Merthyr Tydvil, en Angleterre : elle était due aux ingénieurs Trewitick et Vivian.

La locomotion sur les routes par l'action de la vapeur ne devait réussir et prendre l'immense extension qu'elle possède aujourd'hui, que grâce à l'adoption d'un nouveau système de voie, qui fut d'abord appliqué au transport des matériaux dans les mines de houille. Les chemins à ornières, puis à bandes saillantes, d'abord de bois, puis de fer, diminuaient considérablement la résistance au roulement.

Mais, chose curieuse, ce progrès constitua dans l'origine un

obstacle à l'adoption des voitures à vapeur. Comme ces voitures étaient d'abord assez légères, leurs roues motrices, en tournant rapidement, glissaient sans avancer, *patinaient*, selon l'expression technique. On imagina divers moyens de vaincre cette difficulté pratique, quand un ingénieur anglais, Blacket (1813), prouva que l'adhérence de la locomotive sur les rails peut s'obtenir en donnant aux locomotives un poids suffisamment considérable, pourvu qu'on fît supporter cette pression à l'essieu des roues motrices. C'est de cette époque que date la machine de G. Stephenson, où les essieux sont rendus solidaires par le moyen d'une chaîne sans fin [1]. L'adhérence de toutes les roues de la locomotive se trouve ainsi utilisée.

On peut dire qu'à partir de ce moment, la locomotion sur les voies ferrées, à l'aide de voitures mues par la vapeur, était un problème pratiquement résolu. Toutefois les premières locomotives ne donnaient pas encore un résultat satisfaisant; la quantité de vapeur que leurs chaudières pouvaient fournir était insuffisante, pour la charge ou la vitesse qu'on voulait obtenir.

La raison en était dans la nature de la chaudière, dont l'eau était chauffée par un foyer intérieur, dans un tube qui la traversait dans toute sa longueur. La surface de chauffe n'était pas assez considérable pour la vaporisation qu'il importait d'obtenir, et le tirage était tout à fait insuffisant.

Toutefois les locomotives de Stephenson, d'Hackworth, réalisèrent, sous divers rapports, des perfectionnements qui eurent leur importance : le mécanisme moteur, la transmission, l'adhérence des roues sur les rails, furent l'objet de dispositions nouvelles qu'il serait trop long de décrire. Jusqu'en 1829, la locomotion à vapeur ne fit que les progrès de détails dont nous parlons.

Mais, à cette époque, la substitution à la chaudière ordi-

1. Par exemple, emploi d'une roue dentée s'engrenant avec une crémaillère disposée entre les rails, ou encore de jambes mobiles qui étaient alternativement appuyées sur le sol, puis soulevées.

naire de la chaudière tubulaire, avec tirage produit par un jet de vapeur, produisit une véritable révolution dans l'application des machines à vapeur à la locomotion sur les voies ferrées. C'est à Marc Seguin qu'est due l'invention des chaudières tubulaires; grâce à l'accroissement énorme de surface de chauffe que cette disposition permit d'obtenir sans augmenter les dimensions du générateur, la vaporisation se trouva accrue dans une proportion qui multiplia la puissance des machines; mais, pour suffire à cette production de vapeur, il fallait entretenir l'activité du foyer par un tirage énergique, que la très-faible hauteur des cheminées de locomotive ne pouvait donner.

Ce fut donc aussi une invention heureuse que celle de se servir de la vapeur, quand elle vient d'agir sur le piston, et de la faire évacuer dans la cheminée même. Elle produit ainsi, à chaque coup de piston, un courant rapide qui entraîne au dehors l'air et les gaz de la combustion, et par les tubes détermine un appel au sein même du foyer. Hackworth, Pelletier, G. Stephenson, sont regardés comme les inventeurs de ce perfectionnement important, qui donna toute sa valeur à la chaudière tubulaire pour locomotives.

La première locomotive où ces deux capitales améliorations furent appliquées, fut la *Fusée*, qui sortit des ateliers de Robert Stephenson, et obtint en 1825 le prix du concours ouvert à Liverpool.

§ II — La Locomotive

Voyons maintenant ce qu'est devenue la locomotive, après quarante années de perfectionnements incessants.

Voici une coupe longitudinale (fig. 298, 299 et 300), puis deux coupes transversales à l'avant et à l'arrière de la machine, qui nous feront comprendre les principales dispositions de la machine.

Occupons-nous d'abord du générateur.

La chaudière des locomotives est tubulaire. Elle est composée de deux parties principales : l'une, située à l'arrière et de forme rectangulaire, renferme le foyer, qui, sur toutes les faces, sauf la face inférieure, est enveloppé d'eau ; l'autre, le *corps cylindrique*, ainsi nommé de la forme de son enveloppe, contient deux capacités distinctes ; dans sa moitié inférieure sont logés les tubes par lesquels passent la fumée et les gaz de combustion

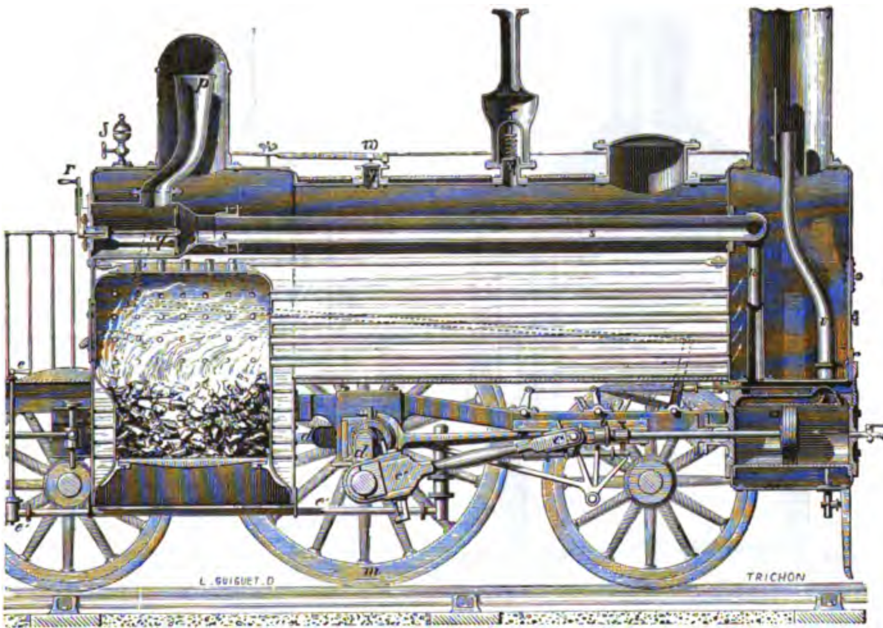


Fig. 298. — Locomotive : coupe longitudinale.

qui du foyer vont à la cheminée. Tous ces tubes, en nombre souvent considérable, sont baignés par l'eau de la chaudière. La moitié supérieure du corps cylindrique est le réservoir de vapeur qui, par un tuyau doublement coudé à l'avant et à l'arrière, *pssu* (fig. 298), débouche d'un côté dans le dôme, de l'autre dans la boîte à vapeur de chacun des deux cylindres de la machine.

Le mécanicien peut à volonté, à l'aide de la manette *r*, ouvrir ou fermer les valves d'un diaphragme *q*, qui donne passage à la

vapeur, l'arrête ou l'introduit en des proportions variées : c'est ce qu'on nomme le régulateur, et ici, à cause de sa forme, le *régulateur à papillon*.

On voit sur le dos convexe du corps cylindrique les appareils accessoires ou de sûreté de toute machine à vapeur, soupapes, manomètre, indicateur de niveau, sifflet d'alarme.

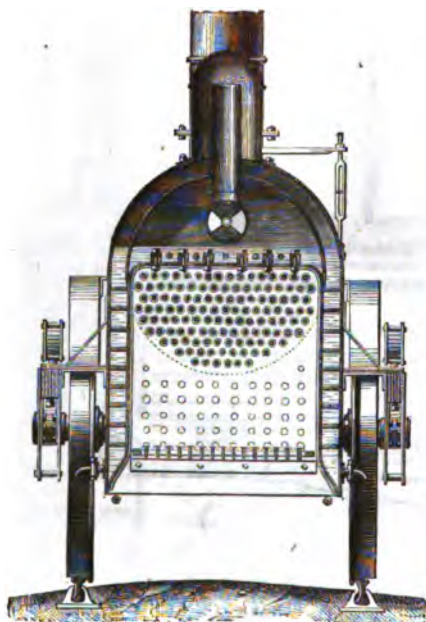


Fig. 299. — Locomotive : coupe transversale dans la boîte à feu.

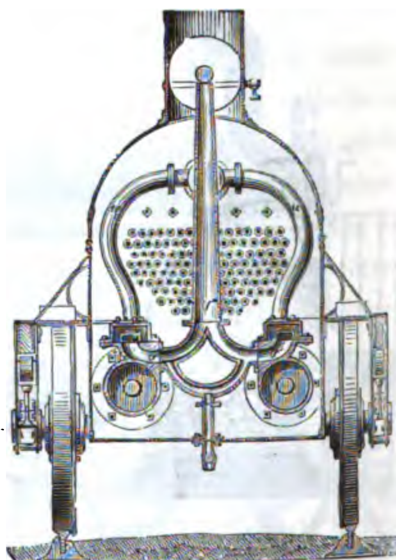


Fig. 300. — Locomotive : coupe transversale dans la boîte à fumée.

Quel est le caractère distinctif de la chaudière d'une locomotive? C'est d'abord, nous l'avons déjà dit, l'énorme étendue de la surface de chauffe relativement à la capacité totale. Pour montrer dans quelle proportion cet élément se trouve accru par l'adoption des tubes, citons quelques nombres. Dans une locomotive Crampton (type de l'Est), les enveloppes du foyer, c'est-à-dire la surface de chauffe par rayonnement, n'est, en mètres carrés, que de $8^{m},65$; la surface de chauffe par contact, c'est-à-dire celle des tubes que lèchent les gaz de la combustion, est

de 88^{m},92, ou, si l'on veut, plus de *dix fois aussi grande*. Dans une machine Engerth, à marchandises, ces nombres sont respectivement, 9^{m},70, 180^{m},70 : les tubes augmentent la surface de chauffe dans le rapport de 1 à 18,6. De là, répétons-le, le second caractère important, le tirage par le jet de vapeur, sans lequel l'activité du foyer ne pourrait suffire à une si considérable production de vapeur, sans lequel, par conséquent, le type de la chaudière tubulaire pour locomotive perdrait son principal avantage. « Dans les machines locomotives, dit M. Perdonnet, le mètre carré de surface de chauffe produit de deux à trois fois autant de vapeur que dans les chaudières à machines fixes. »

Les locomotives sont des machines à haute pression, sans condensation. C'est là une conséquence nécessaire de ce que nous venons de dire. Il faut que la vapeur s'échappe dans l'atmosphère : elle ne peut donc être à basse pression ; il faut qu'en s'échappant, elle produise un jet ou courant ; donc elle ne peut être condensée. Le plus souvent elle est employée avec une tension de 8 à 9 atmosphères.

Mais elle fonctionne avec détente, et un mécanisme particulier, la coulisse de Stephenson, permet de faire varier la détente, et en même temps rend possible le changement de sens dans la direction du mouvement. Une locomotive, comme un bateau à vapeur — on comprend aisément la nécessité d'une telle manœuvre — doit pouvoir marcher en arrière comme en avant.

Continuons notre description.

La locomotive est en réalité, au point de vue du mécanisme moteur, formée de deux machines à vapeur accouplées. Il y a deux cylindres, munis chacun de son piston, de son tiroir, et la tige de chaque piston agit par l'intermédiaire d'une bielle sur la manivelle ou sur le coude de l'essieu qui porte la paire de roues motrices. Il y a même, dans certains types de locomotives, quatre cylindres, quatre machines agissant deux par deux, sur deux essieux différents. Rien de spécial, sauf dans l'agencement et les détails, ne distingue le mécanisme moteur de celui que nous avons vu fonctionner dans les machines fixes, terres-

tres ou marines. Les dessins que nous donnons montrent quelle est la disposition des cylindres ordinairement placés à l'avant, tantôt horizontaux, tantôt légèrement inclinés, tantôt logés hors du châssis qui porte chaudière et machine, tantôt intérieurs. Ici les cylindres sont intérieurs et horizontaux.

C'est ce que nos coupes longitudinales et transversales de la locomotive laissent voir clairement. Dans la figure 300, la distribution et l'échappement sont aisés à comprendre. La vapeur, qui est amenée par le tuyau *ss* jusque dans l'espace qu'on nomme boîte à fumée, trouve là deux conduits *u*, *u* qui vont, en se contournant, aboutir aux boîtes à vapeur des deux cylindres. Après avoir agi sur les pistons, elle traverse les tuyaux *v*, *v'*, et par le tuyau vertical V, qui s'ouvre à la base de la cheminée, elle s'échappe en produisant le mugissement saccadé qu'on entend toujours dans les locomotives en marche.

La rapidité avec laquelle ces bruits produits par l'échappement se succèdent en pleine vitesse d'un train, indique assez combien est grand le nombre des coups de piston dans chaque cylindre. On peut calculer ce nombre d'après la vitesse de la locomotive. Dans les trains rapides, cette vitesse atteint 60 et même 80 kilomètres par heure; en supposant cette distance parcourue par une locomotive à voyageurs (système Crampton) dont la roue motrice a $2^m,30$ de diamètre ou $7^m,20$ de développement, on trouve qu'en une heure, la machine a fait 11 111 tours de roue, dont chacun correspond à une double course des pistons. C'est trois doubles courses, ou six courses simples par seconde.

§ III — Principaux types de Locomotives

Si la locomotive a un caractère spécial qui la distingue des autres machines à vapeur, des machines fixes de l'industrie, comme des machines mobiles de la navigation, il ne s'ensuit

pas qu'elle constitue un type unique et uniforme. C'est un *genre*; mais ce genre comprend des espèces et de nombreuses variétés.

Ces espèces, dont je ne puis décrire ici que les principales, ont été successivement créées pour satisfaire aux exigences multiples et croissantes des nouvelles voies de transport. Les locomotives se sont divisées d'abord en deux types bien tranchés :

Les *locomotives à voyageurs*, uniquement destinées au transport rapide des convois de faible masse : service de grande vitesse ;

Les *locomotives à marchandises*, spécialement consacrées à mouvoir, à une vitesse modérée, les plus lourdes charges : service de petite vitesse.

Tout naturellement, un troisième type intermédiaire entre les deux premiers, participant de leurs qualités moyennes, a dû être créé. Ce sont :

Les *locomotives mixtes*, employées à traîner des convois renfermant à la fois des voitures à voyageurs et des wagons de marchandises ; ou encore, pouvant à volonté être affectées alternativement au service de la grande vitesse ou au service de la petite vitesse.

En dehors de ces trois types principaux, d'autres types de locomotives ont été construits pour satisfaire à des services spéciaux. Nous allons passer en revue quelques échantillons des unes et des autres.

Voici le type par excellence (fig. 301) de la machine à voyageurs à grande vitesse. C'est la locomotive Crampton, caractérisée par le diamètre considérable de ses deux roues motrices, par la faible course du piston, deux conditions qui, jointes à une haute puissance de vaporisation, en font le cheval de course des voies ferrées. Depuis trente-cinq ans bientôt que cette excellente machine est à l'épreuve, elle n'a pas cessé de répondre aux exigences du service. Elle jouit d'une grande stabilité, provenant de l'abaissement du centre de gravité général et de l'écar-

tement des essieux. D'un poids moyen de 30 000 kilogrammes, elle remorque des convois de 12 à 16 voitures pesant de 100 à 130 tonnes, avec une vitesse qui, stationnement compris, s'élève à 60 kilomètres à l'heure.

Une Crampton, sans son tender, coûte 65 000 francs.

Les systèmes Mac-Connel, Buddicom, Sturrock, Stephenson à trois cylindres, sont aussi de bonnes machines à grande vitesse employées sur les chemins étrangers. Le troisième

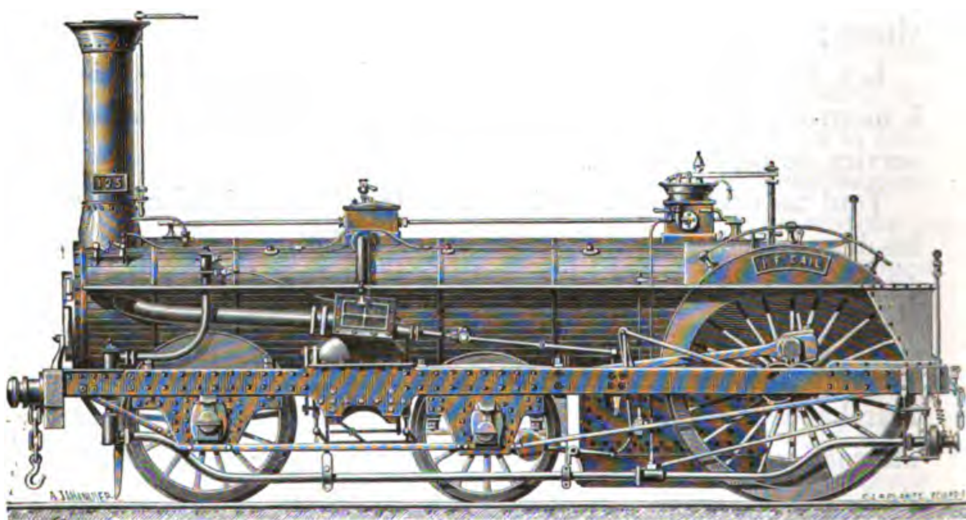


FIG. 301. — Machine à grande vitesse : type Crampton.

cylindre de la machine Stephenson a pour objet d'obvier au mouvement de lacet que prend la locomotive sous l'action des deux pistons latéraux, et que ressentent toutes les voitures du train. On se rappelle que c'est aussi en partie pour un motif d'équilibre, que M. Dupuy de Lôme a employé trois cylindres dans ses machines marines.

On peut prendre de même le type Engerth comme le plus tranché des machines locomotives à petite vitesse destinées à remorquer de lourds convois. A considérer seulement la physionomie extérieure, et à la mettre en parallèle avec une machine

Crampton, on voit à l'instant qu'on a affaire à une puissante machine, et que si l'une peut être comparée à un cheval de course, l'autre le sera non moins légitimement à un cheval de camion ou de halage.

La vitesse moyenne des Engerth (il y en a plusieurs variétés) est de 24 kilomètres à l'heure; mais elles remorquent des convois de 450 tonnes. Leur poids atteint 63 tonnes, qui se répartissent en partie avec le poids du tender sur les roues de ce dernier, mais qui sont principalement supportées par quatre paires de roues d'égal diamètre, rendues solidaires par des

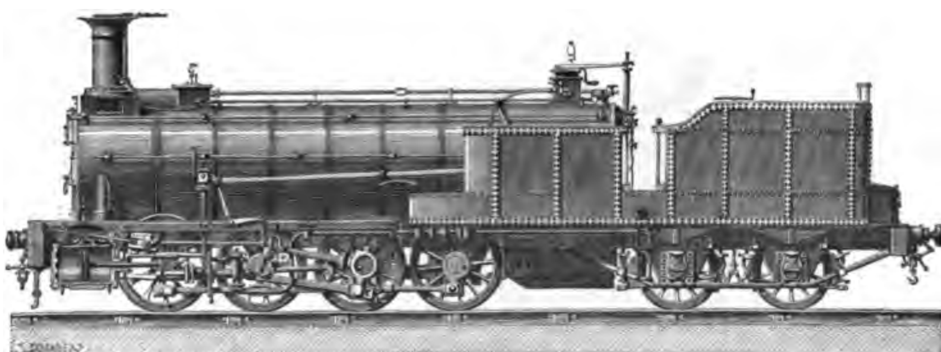


FIG. 302. — Locomotive à marchandises, petite vitesse : type Crampton.

bielles d'accouplement. Contrairement au type Crampton, les machines à marchandises de ce type ont donc plusieurs paires de roues motrices, de petits diamètres, et une longue course pour les pistons de leurs cylindres. Grande longueur de la chaudière, du corps cylindrique et des tubes, grandes dimensions du foyer.

Là, avec la grande surface de chauffe et la puissance de vaporisation de la chaudière, est le secret de la force de traction énorme dont est doué ce type remarquable.

Les premières Engerth [1] étaient munies d'un système d'en-

1. Ainsi nommées du nom de l'inventeur, ingénieur autrichien, qui les destinait d'abord à la traction sur des lignes à fortes rampes.

grenage ayant pour objet de leur permettre de gravir les rampes du Sœmmering.

Le type des machines mixtes, ou locomotives à moyenne vitesse, participe des deux premiers types. Deux paires de roues couplées, d'un diamètre qui varie entre 1^m,50 et 1^m,70, moyenne longueur de la course du piston, poids de 25 à 30 tonnes, vitesse réglementaire de 45 kilomètres à l'heure, remorquage de 180 à 200 tonnes, tous ces éléments, comme on voit, sont compris entre les éléments correspondants des types extrêmes.

Puis viennent des locomotives, tantôt économiques et de faible puissance relative, tantôt coûteuses et compliquées, mais



Fig. 303. — Machine à marchandises de la ligne du Nord, à douze roues couplées et à quatre cylindres.

possédant une force de traction qui les rend capables de remorquer les plus lourdes charges, par les temps de brouillard et de pluie, et de gravir les fortes rampes aujourd'hui adoptées sur un grand nombre de voies ferrées nouvelles. Ces dernières machines, dont la figure 303 représente un modèle, sont dites *locomotives de montagnes* ou *pour fortes rampes*.

Il faudrait, pour être complet, multiplier les descriptions et les figures, citer les *locomotives-tender* qui font le service des gares ou servent de remorqueurs aux convois trop chargés; les *locomotives de secours* expédiées sur les lignes en cas d'accident; puis les types des lignes étrangères, les locomotives des chemins d'Allemagne ou d'Amérique, chauffées au bois, et auxquelles leurs avant-trains articulés, leurs chasse-bœufs,

leurs cheminées largement évasées par le haut, donnent un aspect extérieur si original. Mais des détails aussi complets et circonstanciés dépasseraient le cadre de cet ouvrage.

§ IV — Les Voitures a vapeur ou Locomotives routières

Les premières voitures à vapeur ont été conçues et essayées sur les routes ordinaires, avant l'invention des chemins de fer. On a vu qu'elles n'ont pu réussir.

Or les raisons de ces insuccès étaient multiples : les unes provenaient de l'imperfection relative des machines à vapeur employées à cet usage, et aussi des organes du mouvement; les autres résidaient dans la nature même de la voie sur laquelle les voitures devaient se mouvoir.

La puissance d'une locomotive se résume en quelque sorte dans son poids, bien qu'il soit erroné de croire à la nécessité d'augmenter le poids pour accroître l'adhérence. Les roues, les roues motrices surtout, supportent ce poids toujours considérable, et s'en déchargent sur la route même aux points où elles se trouvent en contact avec celle-ci. Or, quelque bien pierrée et entretenue que soit la route, le sol enfonce sous la pression, des ornières se creusent, et au bout de peu de temps les machines restent en route.

A Londres, en 1862, on a employé des locomotives du système Bray pour remorquer sur des routes ordinaires, macadamisées ou pavées, de lourds fardeaux, des trucs ou trains chargés de masses trop lourdes pour être mises en mouvement par des chevaux.

En 1864, on fit à Nantes des expériences avec une locomotive routière construite par un de nos habiles mécaniciens, M. Lotz. Au mois d'août de l'année suivante, ces expériences furent reprises à Paris et donnèrent des résultats intéressants. En voici

la description, que nous empruntons au *Dictionnaire des sciences mathématiques appliquées* de M. Sonnet :

« La machine de M. Lotz est de 5 chevaux-vapeur. Elle porte avec elle son tender. La chaudière est montée sur quatre roues; le train de devant est mobile autour d'une cheville-ouvrière, comme dans les voitures ordinaires. Tout le mécanisme est placé au-dessus de la chaudière et parfaitement visible. L'arbre moteur transmet le mouvement à l'une des roues de derrière par l'intermédiaire d'une chaîne sans fin, engrenant avec une roue verticale solidaire avec l'essieu. La bande des roues de derrière a $0^m,20$ de largeur : le constructeur a ainsi évité les ornières. Les roues sont montées sur ressorts, ce qui prévient les secousses brusques capables de fausser les bielles. Un homme assis sur le devant de la locomotive manœuvre les roues de devant et fait tourner le véhicule avec la plus grande facilité, à l'aide d'une petite roue verticale analogue à celle dont se sert le timonier à bord des navires. »

Avec une charge de 5 à 6 tonnes, la vitesse de la locomotive Lotz atteignait 16 kilomètres à l'heure sur une route en bon état d'entretien; elle remorquait de 12 à 15 tonnes avec une vitesse de 6 kilomètres, gravissant des pentes qui variaient de $0^m,7$ à $0^m,13$.

Un des inconvénients de ce mode de transport, ce sont les variations considérables des efforts à exercer par des moteurs dont la force doit être sensiblement constante. La locomotive routière Larmanjat répond à cette difficulté. Aux roues motrices de grand diamètre, marchant avec une vitesse de 16 kilomètres par exemple, on peut substituer rapidement deux roues de plus petit diamètre, solidaires et disposées à l'intérieur des premières. Cette substitution entraînant une diminution de la vitesse de la machine, vitesse réduite à moitié, j'imagine, la puissance de traction sera devenue double, et la locomotive pourra vaincre alors les obstacles que la pente ou le mauvais état de la route aura suscités dans le trajet. Une machine de ce système figurait, en 1867, à l'Exposition universelle;

elle avait la force de 3 chevaux-vapeur. « Partie de la gare d'Auxerre, remorquant un lourd camion à basses roues, portant une charge de plus de 3000 kilogrammes, et ainsi chargée, au moyen de l'emploi de ses petites roues, elle a pu gravir une longue rampe de $0^m,08$ par mètre, avec une vitesse moyenne de 8 kilomètres à l'heure. » D'autres expériences, faites d'une manière continue aux environs de Paris, ont été, paraît-il,

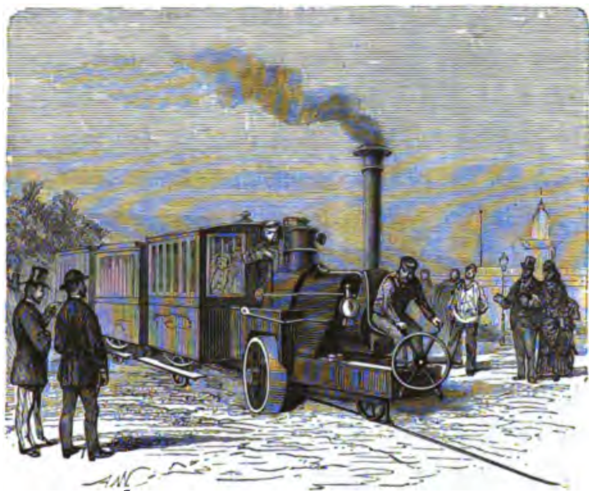


Fig. 304. — Locomotive routière, système Larmanjat.

très-favorables à ce système. La vue que nous donnons de la locomotive routière de M. Larmanjat a été dessinée d'après nature, à l'un des nombreux essais faits tout récemment à Paris, au Trocadéro.

Nous devons citer aussi la locomotive routière de M. Albaret, de Liancourt (Aisne), laquelle a été, pendant deux années, expérimentée dans les départements du Nord et du Jura, remorquant, sur des routes dont les rampes atteignaient $0^m,05$ à $0^m,06$, des charges de 12 tonnes, à une vitesse maximum de 6 kilomètres à l'heure; celle de M. Garret, qui a remorqué, d'Auxerre à Avallon et retour, une diligence chargée de quinze personnes, à la vitesse moyenne de 11 kilomètres.

Les Anglais et les Américains ne sont pas restés en arrière

dans cet ordre de recherches. Ils ont fait de nombreuses tentatives pour résoudre pratiquement la question de la locomotion à vapeur sur les routes ordinaires. Pour eux, comme pour nos ingénieurs et constructeurs français, la difficulté à vaincre était d'éviter les ornières occasionnées par le poids de la machine. C'est ainsi que, dans le système Boydell, on employait un rail sans fin venant se placer au-devant de la roue et reposant sur le sol au moyen de larges patins. La complication du mécanisme et la faible vitesse obtenue ont fait abandonner ce système. Le système Bray avait adopté des roues de fer de grandes dimensions, munies de griffes mobiles à leur circonférence; mais il résultait de là une détérioration rapide des routes.

Pour résoudre le même problème, un constructeur d'Édimbourg, M. Thomson, a imaginé de garnir les jantes des roues motrices de sa machine de bandes de caoutchouc vulcanisé qui ont une épaisseur de $0^{m},125$, sur une largeur de $0^{m},30$.

« Ces bandes supportent parfaitement le poids de la machine[1], et roulent sur les routes ordinaires sans écraser les pierres qui se trouvent à la surface. Grâce à l'élasticité du caoutchouc, le contact entre la jante et le sol n'a plus lieu suivant une génératrice, mais suivant une surface sur laquelle la pression se trouve répartie. Les roues ne s'enfoncent plus alors dans le sol, et même, si l'on fait circuler la locomotive sur une route nouvellement chargée, elle passera sur les pierres fraîchement cassées, sans que le bandage soit coupé ni détérioré. La force employée pour faire marcher une locomotive de ce genre sera donc de beaucoup inférieure à celle nécessaire pour une machine à bandages lisses de fer; car, dans ce dernier cas, la roue écrase le ballast et occasionne une perte de force notable. »

Une locomotive de ce modèle a pu circuler dans une prairie sans laisser de fortes traces de son passage. Sur une route

1. Article de M. Sauvée dans les *Annales industrielles*, excellente revue à laquelle nous empruntons le dessin de la locomotive routière Thomson.

horizontale, elle peut remorquer 30 tonnes avec une vitesse variant de 4 à 10 kilomètres à l'heure. Sa force effective est de 16 à 18 chevaux. En Angleterre, on en emploie plusieurs au transport du charbon de la mine aux usines voisines; à Édimbourg, M. Thomson a appliqué sa locomotive à la traction

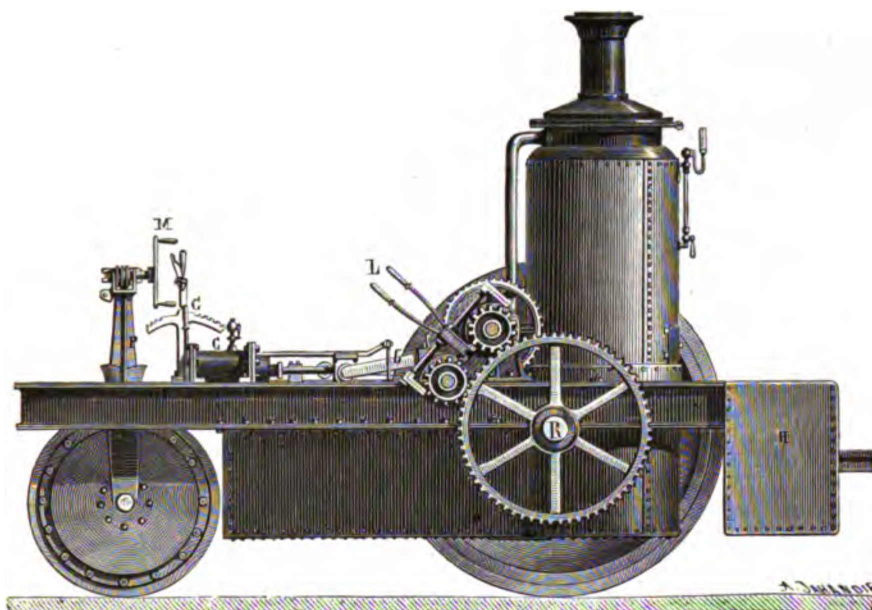


Fig. 305. — Locomotive routière, système Thomson.

des omnibus. Des essais enfin ont dû être faits aux Indes, par l'administration postale, pour le transport de ses dépêches dans la province du Pundjab, entre les villes de Loodlana, Ferozepore et Lahore.

Le dessin que nous donnons ici, de la locomotive routière Thomson, suffira pour faire comprendre la disposition générale des organes. On voit que la machine à vapeur est une machine à cylindre horizontal C, communiquant le mouvement par une bielle à un arbre moteur doublement coudé, muni d'un pignon en rapport avec une roue d'engrenage calée sur la roue motrice. Grâce à cette disposition, le mouvement est

donné à l'essieu R des roues motrices de la voiture avec une vitesse qui, pour une même vitesse des pistons, dépend des nombres de dents de la roue et du pignon. Mais l'arbre moteur est muni d'un second pignon qui engrène avec une seconde roue calée elle-même sur un autre arbre moteur parallèle au premier, et ce dernier, par un troisième pignon, communique son mouvement à la première roue d'engrenage. Il est bien entendu que ces deux systèmes fonctionnent isolément : le conducteur passe à volonté de l'un à l'autre à l'aide de leviers de manœuvre L à sa portée. Il peut ainsi faire varier, pour une même action de la vapeur, la vitesse des roues motrices dans un rapport qui varie du simple au double (plus exactement de 16 à 39)[1].

§ V — La Locomobile

Il nous reste à examiner un quatrième type de machines à vapeur récemment créé, dont l'usage se multiplie de plus en plus, et qui n'a guère de ressemblance avec la locomotive que le nom et l'apparence extérieure. C'est la *locomobile*.

En réalité, la locomobile est une machine fixe, mais une machine fixe transportable. Relativement légère et peu encombrante, elle est disposée comme la locomotive sur un châssis et montée sur des roues : chaudière, mécanisme moteur, volant,

1. Le problème mécanique de la locomotion à vapeur sur les routes ordinaires peut être, comme on le voit, considéré comme résolu. Cela veut-il dire que l'emploi des locomotives routières se généralisera promptement? Il est difficile de répondre à cette question; car, à côté du point de vue technique, il y a le point de vue industriel et commercial. Il faut que ce mode de transport soit réellement économique, et cela dépend évidemment d'une foule de circonstances étrangères à la pure mécanique. Dans les grandes villes comme Paris, Londres, où les besoins de la circulation sont si continus et si pressants, les locomotives routières pourront être utilement employées, si l'on imagine des moyens qui rendent cet emploi prudent, si l'on pare aux dangers que la rencontre fréquente des voitures et des piétons multiplierait à chaque instant. Il est probable que ce mode de locomotion sera essayé, et peut être définitivement adopté, sur quelques-unes des grandes voies projetées par l'édilité parisienne sous le nom de *tramways*.

tout est réuni de manière à fonctionner sans aucune mise en train, si ce n'est celle de l'alimentation et de l'allumage. La machine a-t-elle achevé son service en un point, on la conduit ailleurs, là où se fait sentir le besoin de la force motrice, qu'elle dispense ainsi successivement en des lieux éloignés les uns des autres. Les roues de la locomobile ne sont pas, comme dans la locomotive, des roues motrices; elles sont absolument indépendantes du mécanisme et n'ont qu'un objet : rendre facile le transport de la machine sur les routes ou à travers les champs. A l'aide d'un ou deux chevaux attelés au limon, c'est la chose du monde la plus simple.

C'est aujourd'hui un moteur universellement employé. Dans l'agriculture, dans les constructions industrielles, les locomobiles servent à une foule d'usages et remplacent avec avantage les moteurs animés.

Dans les ateliers de maçonnerie d'une certaine importance, ce sont des locomobiles qu'on emploie à hisser les matériaux; elles donnent le mouvement aux monte-charges; elles font tourner les moulins à broyer, à fabriquer le mortier; elles sont substituées aux ouvriers qui soulèvent les moutons des sonnettes ou qui manœuvrent les grues. Les grues à vapeur mues par des locomobiles se voient fréquemment aujourd'hui dans nos ports marchands ou militaires.

On emploie les locomobiles au mouvement des pompes établies provisoirement pour l'épuisement des terrains de construction. Nous en avons vu une fonctionner devant le Louvre, pendant le siége de Paris : elle faisait mouvoir une pompe qui versait l'eau de la Seine dans des réservoirs établis le long des quais.

En agriculture, c'est le moteur adopté aujourd'hui dans tous les cas où s'introduit l'usage de l'action de la vapeur. Ainsi dans les opérations agricoles proprement dites, notamment le labourage, c'est une locomobile qui, installée à l'une des extrémités de la pièce de terre, communique le mouvement aux engins qui portent les socs de la charrue. De même dans les opérations

d'industrie agricole qui ont pour objet les produits, leur manutention, transformation, etc., machines à battre, hache-paille, concasseurs, pressoirs, coupe-racines. Partout où l'on agit sur de grandes masses, il peut y avoir, et il y a en effet avantage à substituer aux moteurs animés ordinaires, aux hommes et aux animaux, le moteur par excellence, la vapeur.

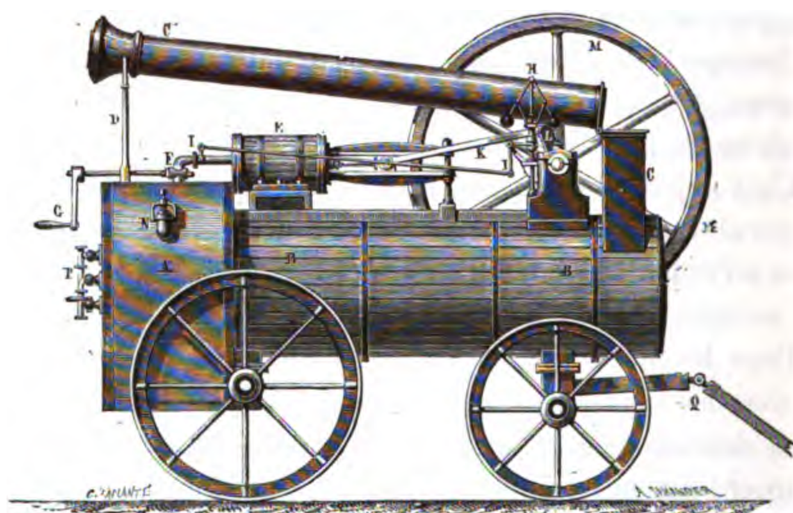


Fig. 306. — Locomobile Calla.

A, BB. Boîte à feu et corps cylindrique tubulaire. — C. Cheminée. — E. Cylindre. — M. Volant. — K, L. Bielle et manivelle. — HH. Régulateur.

Les locomobiles sont des machines qui ont reçu, suivant leur destination et l'inspiration des constructeurs, des formes extrêmement variées.

La chaudière est, comme dans la locomotive, une chaudière tubulaire composée d'un foyer A situé à l'arrière, et du corps cylindrique BB, qui renferme les tubes. La puissance des locomobiles est faible : on en construit de 1 et 2 chevaux, jusqu'à 8 chevaux. Il n'y a donc pas nécessité d'une aussi grande surface de chauffe que dans les locomotives; aussi les tubes sont-ils plus gros et moins nombreux.

La machine est à haute pression et sans condensation, la

vapeur s'échappant dans la cheminée pour produire le tirage. Le tirage ne doit jamais être assez activé pour attirer hors du foyer des escarbilles enflammées, toutes les fois du moins que la locomobile est employée dans le voisinage de matières inflammables, ce qui arrive souvent en agriculture: il y aurait, sans cela, danger d'incendie.

Dans la locomobile que représente la figure 306, le cylindre est horizontal et placé au-dessus de la chaudière. La tige du piston, guidée par une glissière, met en mouvement la bielle K, qui s'articule à la manivelle de l'arbre moteur et du volant. La légende donne l'indication des organes ordinaires de la machine, qui n'ont rien de particulier.

Les locomobiles sont des machines peu économiques : elles consomment de 5 à 6 kilogrammes de houille par heure et par force de cheval. Nous avons dit qu'elles sont légères, et en effet le poids d'une machine de 4 à 5 chevaux ne dépasse guère 2 tonnes.

§ VI — Applications diverses de la vapeur

On vient de voir ce qu'est la machine à vapeur, sur quels principes de physique et de mécanique repose sa construction; quelles sont les formes variées qu'elle a prises pour être appropriée aux services multiples qu'on lui demande dans l'industrie manufacturière, dans l'industrie des transports terrestres et maritimes, dans les travaux publics et dans l'agriculture. Il nous reste à dire un mot des applications mêmes de la vapeur, et du rôle immense qu'elle joue dans les sociétés modernes.

Les premières machines à vapeur, on l'a vu, étaient employées à épuiser les eaux des mines : c'étaient les moteurs de pompes puissantes. Aujourd'hui encore, elles servent aux mêmes travaux. Dans les grandes villes, ce sont des machines à vapeur qui puisent dans les rivières et les fleuves l'eau néces-

saire aux besoins publics ou domestiques : telles sont, à Paris, les pompes à feu de Chaillot, de Saint-Maur, de Ménilmontant.

En Angleterre et en Hollande, on a installé des machines à vapeur pour faire mouvoir les pompes qui ont desséché des marais, des lacs, comme les lacs de Harlem, de Zuid-Plas, et l'on parle de dessécher de la même manière le Zuiderzée tout entier.

La locomobile est employée partout maintenant dans les travaux publics : elle fait mouvoir les moutons des sonnettes dans les fondations sur pilotis, les monte-charges des constructions, les grues des chemins de fer et des ports. La vapeur donne le mouvement aux dragues, aux toueurs ou remorqueurs des rivières et des canaux, aux bacs, aux pompes à incendie. Parmi les applications intéressantes de la puissance mécanique, il faut citer les mille opérations qui ont pour objet la fabrication des machines mêmes, et notamment le forgeage des grosses pièces métalliques. L'outil qui sert à cet usage est le *marteau-pilon* sur lequel nous croyons devoir donner quelques détails.

Le marteau-pilon à vapeur, qui a tant contribué à développer la fabrication du fer, cette matière première de la mécanique et de l'industrie moderne, a été inventé, vers 1841, par le directeur des forges du Creuzot, M. Bourdon[1]. Ces gigantesques marteaux, qu'emploient toutes les mines où le fer et l'acier sont forgés en pièces de grandes masses, ne reçoivent pas leur mouvement de la machine à vapeur; mais c'est la vapeur qui directement les élève ou les abaisse entre les deux énormes montants de fonte qui leur servent de guide dans leurs allées et venues.

La figure 307 montre comment fonctionne le marteau-pilon. Imaginez un mouton de fonte, dont le poids atteint jusqu'à 15 000 kilogrammes, se mouvant entre deux montants ou glissières, suspendus à la forte tige du piston d'un cylindre où la

1. Un ingénieur anglais, M. Nasmyth, a suivi de près notre compatriote ; mais, d'après Poncelet, c'est bien à M. Bourdon que revient la priorité.

vapeur peut pénétrer à volonté. Celle-ci arrive par le tuyau V, et de là, par une lumière pratiquée au bas du corps de pompe, sous le piston, qui est alors chassé de bas en haut par la force élastique du fluide. A l'aide d'un levier L, on agit sur une tige T qui abaisse un tiroir latéral, et la vapeur s'échappe dans l'air par une cheminée UE. La vapeur agit ici par simple effet; mais on construit des marteaux-pilons où elle sert à la fois à

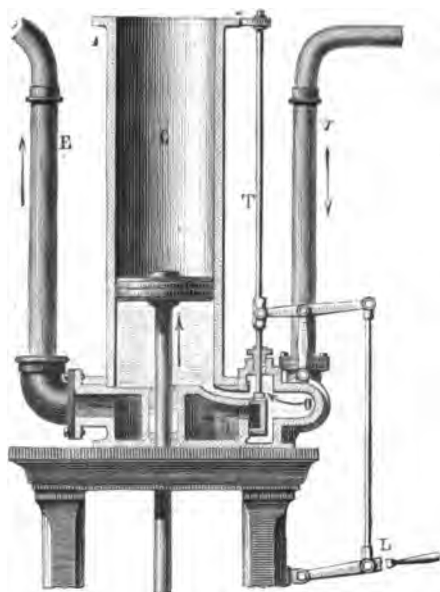


FIG. 307. — Marteau-pilon : coupe du cylindre.

soulever l'énorme masse et à la précipiter dans sa chute. Voici, sur l'un de ces engins, quelques détails que nous empruntons à l'ouvrage *les Grandes Usines*, de M. Turgan :

« La compagnie australienne du chemin de fer Victoria a commandé un énorme marteau-pilon à vapeur, qui a été construit dans l'usine de Kirkstall, à Leeds (Angleterre). Ce marteau est à double ou à simple effet : ainsi la vapeur agit dans les deux sens, c'est-à-dire qu'elle peut alternativement soulever le marteau et arriver en dessus pour précipiter sa chute, et augmenter, par conséquent, l'action de la pesanteur.

Cette disposition, qui permet en même temps de multiplier le nombre de coups dans un temps donné, est surtout très-avantageuse pour forger des pièces de grandes dimensions; on

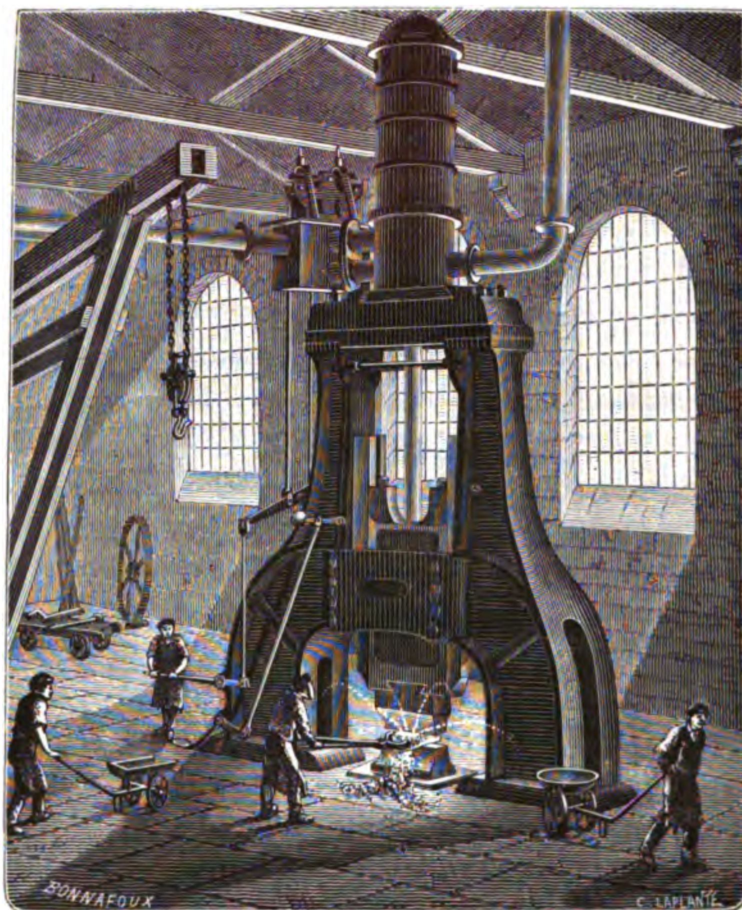


FIG. 308. — Marteau-pilon à vapeur.

peut en effet, grâce à elle, opérer le travail en une seule chaude, et l'on économise, de cette manière, du temps, du combustible et du métal.

» L'effet de cet engin puissant est égal à celui que produirait le poids de 16 000 kilogrammes frappant quarante coups par minute. L'action alternative du double et du simple effet peut

être obtenue instantanément. A l'aide d'un tiroir convenablement disposé, on peut également changer en un instant la chute et la force du coup. On sait que, pour tous les marteaux qui agissent par la gravité, le travail mécanique produit est représenté par le poids de la masse multiplié par la hauteur de la chute. Par conséquent, plus cette hauteur est grande, plus l'action est considérable, mais aussi plus lent est le travail. Avec le marteau à double effet dont il s'agit, la force du coup peut être triplée et la vitesse doublée en même temps. La vapeur qui fait mouvoir le marteau est obtenue avec la chaleur perdue du foyer où l'on chauffe le fer à marteler. Le poids de tout l'appareil, comprenant la masse du marteau, l'enclume, le billot, le cylindre à vapeur, etc., est d'environ 100 000 kilogrammes. »

Le marteau-pilon est, pour ainsi dire, une machine à vapeur spéciale, où la force est directement employée à produire le mouvement de l'outil. Dans les grandes usines, fabriques de machines, forges, scieries mécaniques, ce sont le plus souvent les machines fixes, quelquefois les locomobiles, qui donnent et distribuent partout, par l'intermédiaire d'engrenages, de courroies, le mouvement à tous les ateliers : rabotage, alésage, mortaisage, forage, taraudage, polissage des pièces métalliques, tout reçoit son impulsion de la vapeur, et l'on ne sait lequel on doit admirer le plus dans ces travaux formidables, de la puissance de l'engin, ou de sa docilité à se plier aux usages les plus divers.

N'est-ce pas quelque chose de merveilleux que de voir ces machines-outils travailler l'acier et le fer avec la même aisance que le bois sous la main de l'ouvrier menuisier, charpentier ou charron; ces cisailles découper le fer brut, tailler les épaisses feuilles de tôle, comme le ciseau du tailleur fait de l'étoffe la plus souple? « Autrefois on grattait à peine le fer; aujourd'hui on le rabote comme du bois, on le découpe et on le perce comme du carton. Certaines machines-outils d'Indret sont assez solidement établies pour pouvoir enlever un copeau de 40 millimètres sur une longueur de 11 mètres; le chariot mobile qui porte le

burin pèse à lui seul 14 tonnes. Parmi les machines les plus curieuses d'Indret, nous devons signaler un tour de Mazeline, destiné à raboter circulairement les arbres coudés. Son burin est porté par un disque tournant dans un cadre; la pièce que l'on travaille traverse ce disque et avance sur un chariot pour présenter successivement à l'outil tous les points qui doivent être atteints. On remarque également un tour en l'air de M. Calla, dont le plateau mesure 5 mètres de diamètre; des bancs à aléser, à percer, à planer le fer, la fonte et le bronze par tous les moyens connus [1]. »

Si l'on voulait énumérer et décrire, même sommairement, tous les usages de la machine à vapeur dans l'industrie moderne, ce n'est point un chapitre, mais un livre, et un gros livre qu'il faudrait écrire. On la trouverait dans les hauts fourneaux, où des machines horizontales fonctionnent comme souffleries pour activer et entretenir les feux; dans les tailleries de diamants, où la vapeur imprime aux meules la prodigieuse vitesse de 2500 tours à la minute; dans les brasseries, où elle met en mouvement les pompes qui servent au transvasement des masses liquides; dans les papeteries, où elle fait fonctionner les machines laveuses et blanchisseuses du papier; dans les tuileries, dans les fabriques de literie, de pianos, où elle scie le bois, le découpe en arabesques de toutes formes; dans les fabriques d'orfévrerie; à la Monnaie, où les presses d'Uhlhorn, perfectionnées par Thonnelier et mues par la vapeur, frappent jusqu'à 2400 pièces à l'heure; dans les fabriques de tabac, de chocolat, et enfin dans cent autres opérations industrielles qui ont besoin d'un moteur puissant, régulier, rapide, continu. Mais il est deux grandes industries où la vapeur joue un rôle d'une importance immense : dans les fabriques de tissus, les filatures, ces pourvoyeuses de vêtements du genre humain tout entier; puis dans l'imprimerie typographique et lithographique, qui nous donne l'aliment intellectuel sous sa forme la plus assimilable, le livre et le dessin.

1. Turgan, *les Grandes Usines de France.*

Quelques mots seulement de l'application de la vapeur à l'imprimerie.

C'est en novembre 1814, au moyen d'une presse inventée par F. Kœnig, qu'eurent lieu les premiers tirages de feuilles imprimées par la vapeur. Le journal anglais le *Times* avait eu l'honneur et le profit de ce premier essai, qui permit d'obtenir mille exemplaires à l'heure. Voici ce que dit M. A. F. Didot de cette application dans son *Essai sur la typographie :*



FIG. 309. — Presse typographique à vapeur.

« Dans cette machine, la *forme* ou châssis contenant les types passe horizontalement, par un mouvement de va-et-vient, sous le cylindre d'impression sur lequel la feuille de papier est enroulée et retenue par des cordons. Dans l'origine, l'encre, chassée par un piston de la boîte cylindrique placée au sommet, tombait régulièrement sur deux rouleaux de fer qui la communiquaient à une série d'autres rouleaux, dont les deux derniers, de cuir, l'appliquaient sur les caractères. Une importante amélioration fut le remplacement du cuir, dont les rouleaux étaient d'abord recouverts, par une composition de colle forte et de mélasse formant une substance élastique très-favorable à l'impressio des caractères. La prise d'encre et sa distribution furent posté-

rieurement améliorées. Enfin, M. Kœnig réunit deux machines semblables, de manière à pouvoir imprimer un journal des deux côtés à la fois. La feuille, conduite par les rubans, était portée d'un cylindre à l'autre en parcourant le chemin dont la lettre S couchée horizontalement (ᔕ), donne l'idée. Pendant sa course sur les cylindres, la feuille recevait sous le premier cylindre l'impression d'un côté, et sous le second cylindre elle recevait l'impression sur le deuxième côté. Mais il faut avouer qu'en 1814, lorsque M. Bentley me montra cette admirable et immense machine, encore fort compliquée, le second côté de la feuille (la *retiration*) ne tombait pas exactement *en registre*.

» Ce n'est qu'après de longues recherches que MM. Applegath et Cowper sont parvenus à donner à leur presse mécanique un tel degré de perfection, que la feuille conduite par les cordons, après avoir reçu la première impression, passe du premier cylindre sur deux tambours de bois qui la retournent, et va s'appliquer sur le contour d'un second cylindre avec une telle précision, qu'elle rencontre les types de la seconde forme, juste au même point où se trouvent imprimés du côté opposé les caractères de la première forme; après quoi elle vient se déposer sur une table placée entre les deux cylindres, où un enfant la reçoit et l'empile. »

Veut-on savoir à quel degré de rapidité l'impression est parvenue, grâce à l'emploi des presses mécaniques mues par la vapeur? Voici quelques faits caractéristiques à cet égard.

La presse d'Applegath, à huit cylindres, employée à l'impression du *Times*, fournit 11520 exemplaires à l'heure. Le *New-York Sun*, journal américain imprimé par la presse Hoe, dont chaque page comprend huit colonnes renfermant chacune deux cents lignes de quarante lettres, tire de 16 à 20000 épreuves à l'heure. Le cylindre central sur lequel s'applique la forme a 6 mètres de développement : huit autres cylindres, comme dans la presse d'Applegath, se chargent successivement des feuilles, et les impriment sur huit faces différentes du cylindre central. A l'aide de seize ouvriers, deux par cylindre,

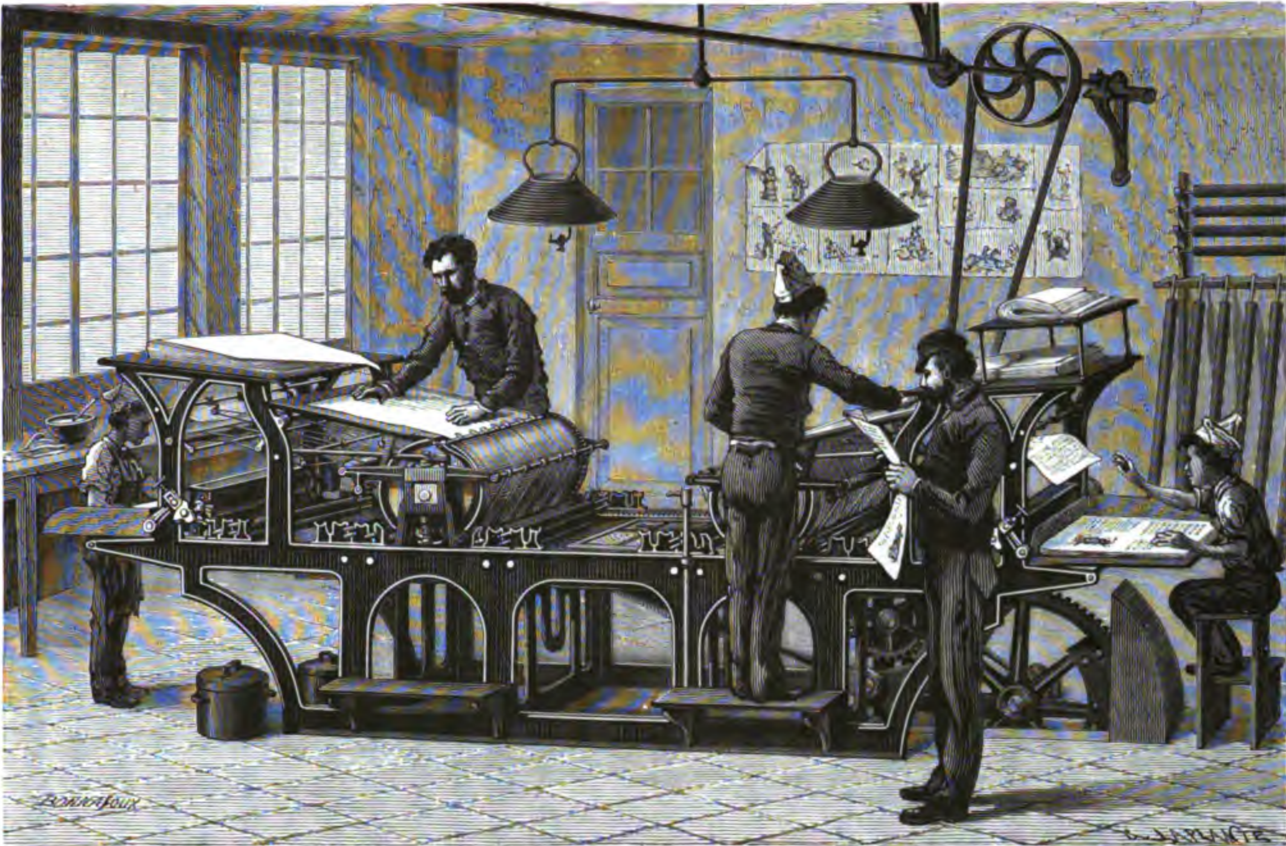


PLANCHE XVIII — LA VAPEUR APPLIQUÉE A L'IMPRIMERIE

PRESSE TYPOGRAPHIQUE MÉCANIQUE A VAPEUR

on obtient une quantité de travail qui eût jadis exigé plus de trois cents pressiers.

Ajoutons que si l'impression mécanique était jadis inférieure, au point de vue de l'art typographique, à l'impression faite au moyen de l'antique presse à bras, aujourd'hui elle a été tellement perfectionnée, que les amateurs les plus difficiles auraient de la peine à distinguer les produits des deux modes d'impression.

Depuis quelques années, la lithographie emploie la vapeur et des presses mécaniques qui, jusque-là, avaient été réservées à la typographie. Les résultats obtenus sont remarquables, et la rapidité du tirage est venue apporter une économie importante à une industrie que la concurrence des produits typographiques menaçait sérieusement.

§ VII — Statistique des Machines a vapeur

Terminons cette revue rapide des innombrables applications de la vapeur par quelques nouvelles données de statistique générale bien propres à montrer la vérité de cette assertion : que la vapeur est l'origine de la plus féconde révolution qui ait jusqu'ici transformé la production humaine, et à justifier le nom de *siècle de la vapeur* qu'on donne quelquefois à notre époque.

En 1865, la France possédait un total de 19 724 machines à vapeur, douées ensemble d'une force de 242 209 chevaux. Dans ce nombre ne sont point comprises les machines locomobiles, dont le chiffre dépassait 4000. C'est, pour notre pays, un accroissement de puissance productrice équivalant à une population active de plus de 5 millions d'ouvriers, résultat certainement dépassé aujourd'hui. A Paris seulement, on comptait, à la même époque, 1189 moteurs à vapeur, d'une force totale de 9782 chevaux ; et en y comprenant la banlieue

(dans le seul département de la Seine), il y avait 2480 machines d'une force de 19150 chevaux. Le mouvement, sur les voies ferrées, des voyageurs et des marchandises, accroîtrait dans une forte proportion les services que, d'après les chiffres qui précèdent, la vapeur rend à notre pays.

En Angleterre, d'après un ingénieur anglais, M. Feyburn, le nombre total des chevaux-vapeur employés atteint le chiffre énorme de 3650000 : c'est une force qui équivaut au travail de 76 millions d'ouvriers, c'est-à-dire plus de trente fois aussi grande que celle des bras qui servent d'auxiliaires aux industries britanniques.

Les chiffres nous manquent pour l'industrie manufacturière des autres pays d'Europe et d'Amérique. Mais on peut se faire une idée de ce qu'ils peuvent être, en considérant l'immense développement qu'a pris le réseau des chemins de fer dans le monde entier, réseau sillonné nuit et jour par la vapeur, celui que tend à prendre de plus en plus la navigation à vapeur sur les mers, les lacs et les fleuves.

En 1867 déjà, la longueur totale de toutes les lignes de fer exploitées sur le globe atteignait 156663 kilomètres, près de seize fois la circonférence entière de notre planète. Depuis, l'Amérique du Nord, à elle seule, a augmenté son réseau de 20000 kilomètres, la Russie, de plus de 6000 kilomètres ; presque partout de nouvelles lignes ont été construites ou commencées : les locomotives répandent maintenant leurs panaches de vapeur dans les Indes, en Australie, jusqu'au Japon, et les *steamboats* sillonnent toutes les mers. La marine, en effet, a suivi l'exemple de l'industrie manufacturière et de celle des transports terrestres, sur une moindre échelle à la vérité, mais dans une proportion qui va toujours grandissant.

En Europe, sur 100000 navires formant à peu près le total des bâtiments de la marine marchande, on compte 4500 navires à vapeur ; mais il faut ajouter qu'en général le tonnage de ceux-ci dépasse de beaucoup le tonnage des bâtiments à voiles. Ainsi, en France, tandis que le tonnage moyen des navires

à voiles est de 60 tonneaux, il atteint 280 tonneaux dans les navires à vapeur.

§ VIII — Explosion des Machines a vapeur

Nous venons de signaler les bienfaits dont la civilisation est redevable à l'invention de la machine à vapeur et à l'introduction progressivement croissante de ce moteur puissant dans toutes les industries. Il faut maintenant faire la part des malheurs qu'elle a occasionnés et dont nous lisons de temps à autre, dans les journaux, les récits lamentables. Chaque médaille a son revers.

Toutes les explosions de machines à vapeur ont en réalité une cause unique : pour une raison ou pour une autre, la pression de la vapeur produite dans la chaudière dépasse la limite de la résistance des parois ; le métal se déchire, éclate sous la force irrésistible du fluide, et, en projetant ses débris, accumule dans son voisinage les ruines et les victimes. Aux effets mécaniques de cette projection terrible, se joignent ceux qu'une masse de vapeur à une température élevée ne peut manquer de déterminer : le chauffeur, les ouvriers ou les ingénieurs, toutes les personnes en un mot qu'atteignent les débris métalliques ou la vapeur brûlante, sont horriblement blessés, broyés ou brûlés.

Quelles sont les causes de l'explosion ? Nous venons de le dire. Un accroissement anormal de pression peut provenir lui-même des causes suivantes :

1° Abaissement du niveau de l'eau, qui a pour conséquence une élévation de température des surfaces métalliques soumises à l'action des gaz incandescents du foyer, sans être refroidies intérieurement par l'eau de la chaudière. Ces surfaces arrivent à la température du rouge ; leur résistance décroît, elles se déforment et se déchirent. Le danger est plus grand encore, si

alors l'alimentation de la chaudière amène brusquement à leur contact l'eau, qui se transforme en vapeur dans des conditions anormales. La surproduction de vapeur qui en résulte suffit pour déterminer l'explosion.

2° Le même accident peut provenir de la présence des incrustations laissées par les eaux contre les parois. La croûte saline empêche le contact de l'eau et du métal, qui rougit, et si cette croûte vient à se détacher brusquement, l'arrivée de l'eau sur les surfaces rougies détermine une subite et considérable production de vapeur dont l'explosion de la chaudière peut être la conséquence.

3° L'eau privée d'air et en repos peut être chauffée sans bouillir à une température dépassant de beaucoup 100°; mais le moindre choc ramène l'ébullition subite et une surproduction de vapeur dangereuse, ainsi que nous l'avons vu en rapportant l'expérience de Donny.

Voilà des causes d'accident indépendantes du bon état de la machine ou du moins de la solidité de sa construction, indépendantes aussi des bons soins et de la surveillance du chauffeur, la première exceptée, qui est, à la vérité, l'une des plus fréquentes. Les remèdes préventifs sont, pour celle-ci, une surveillance attentive du niveau de l'eau, et, s'il s'est abaissé, le soin de n'alimenter qu'avec précaution et après ralentissement du feu. Le choix d'une eau non incrustante, ou en cas contraire le nettoyage fréquent des parois intérieures, voilà ce qu'il faut recommander aux chauffeurs ou aux chefs d'usine.

4° La vapeur peut atteindre une pression qui dépasse les limites de la résistance, si les soupapes de sûreté sont insuffisantes, fonctionnent mal, ou, ce qui est pire encore, bien que malheureusement trop fréquent, si elles sont arrêtées et ne fonctionnent pas du tout. La surveillance de ces appareils doit donc être incessante. « Un mécanicien qui assujettit ses soupapes, dit avec une énergique conviction un célèbre ingénieur anglais contemporain, M. Fairbairn, est comparable à l'insensé qui se précipite dans un magasin à poudre une torche à la

main. » L'ignorance seule explique une pratique aussi déplorable ; et c'est du devoir strict des chefs d'usine et des ingénieurs de la faire cesser, en n'employant que des chauffeurs capables, ou en instruisant ceux qui ne savent point.

5° Enfin une dernière cause d'explosion est la construction vicieuse d'une chaudière, ou, ce qui revient au même, le mauvais état provenant de vieillesse ou d'usure de ses diverses parties.

Nous avons vu, en décrivant les divers types de chaudières, quels sont ceux qui offrent le moins de danger d'explosion ; mais le choix des types n'étant pas subordonné à cette seule condition, les accidents sont pour ainsi dire inévitables. C'est dans les usines où les machines fixes sont employées, et sur les bateaux à vapeur, où les machines sont exposées à plus de causes de destruction, que les explosions sont le plus fréquentes et le plus redoutables : elles sont beaucoup plus rares dans les locomotives, ce qui tient sans doute à une surveillance plus active. Elles sont d'ailleurs ici moins dangereuses, parce qu'elles se bornent souvent à la rupture d'un tube, accident auquel le mécanicien remédie immédiatement en fermant le tube à l'aide de tampons.

CHAPITRE X

LES MACHINES A VAPEURS COMBINÉES, A AIR CHAUD, A GAZ

§ I — Les Machines a vapeurs combinées

Les principes de la théorie mécanique de la chaleur permettent de démontrer que la valeur d'une machine thermique, son rendement, ou, ce qui est la même chose, son *coefficient économique* dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la différence des températures extrêmes entre lesquelles elle fonctionne. Il importe peu, à ce point de vue, qu'on emploie un liquide ou un autre, pour obtenir la vapeur dont la force élastique est utilisée comme moteur. La quantité de chaleur dépensée étant la même, comme c'est cette chaleur qui se convertit en travail, le travail de la machine reste le même.

On comprend donc qu'il peut y avoir avantage à employer un liquide qui se vaporise à une température inférieure à celle de la vaporisation de l'eau. L'éther sulfurique, par exemple, bout à 37°. La vapeur d'eau qui, au sortir du cylindre, vient se liquéfier dans le condenseur, abandonne une quantité de chaleur suffisante pour vaporiser l'éther. La vapeur de ce dernier liquide peut alors servir à faire fonctionner une seconde machine

annexée à la première, et dont le condenseur peut ainsi être maintenu à une température inférieure à celle du condenseur de la vapeur d'eau. Cette combinaison revient à accroître la différence entre les températures extrêmes où le fluide élastique fonctionne, depuis son entrée dans le cylindre jusqu'à sa sortie dans l'atmosphère ou sa condensation. La quantité de chaleur utilisée ou de travail mécanique sera donc accrue d'autant.

Tel est le principe sur lequel sont basées les machines à vapeurs combinées dont nous allons dire quelques mots.

Un ingénieur français, M. du Trembley, a imaginé et fait construire, en 1840, une machine à vapeurs combinées d'eau et d'éther, qui a été installée sur un des paquebots faisant le service régulier d'Alger à Marseille. Voici quelles en étaient les dispositions principales.

En sortant du cylindre, la vapeur d'eau arrive dans un condenseur clos traversé par une série de tubes verticaux en partie remplis d'éther. En se condensant autour des tubes, la vapeur d'eau leur communique sa chaleur de vaporisation et élève assez leur température pour que l'éther qu'ils renferment se réduise lui-même en vapeur. La vapeur d'éther, recueillie dans un réservoir supérieur, est admise, de là, dans un cylindre où elle agit sur un piston dont la tige est liée à l'arbre de la machine. Le travail de ce piston s'ajoute ainsi au travail du piston que fait mouvoir la vapeur d'eau.

Au sortir du second cylindre, la vapeur d'éther passe dans un condenseur spécial également formé d'un système de tubes, mais ceux-ci entourés d'une masse d'eau froide sans cesse renouvelée. Cette vapeur reprend donc l'état liquide sous l'influence du refroidissement des tubes, et l'éther qui en résulte est refoulé, par une pompe que meut le balancier, dans le réservoir situé à la partie inférieure des tubes du premier condenseur. L'eau de condensation, échauffée par l'excès de chaleur de la vapeur d'eau, est d'ailleurs refoulée elle-même dans la chaudière.

La grande inflammabilité de l'éther, qu'on ne pouvait,

malgré les plus grandes précautions, empêcher de s'échapper par les joints des organes, rendait ces machines dangereuses, à cause des explosions ou des incendies possibles. Néanmoins elles ont été longtemps expérimentées sur les bateaux *le Du Trembley* et *le Galilée*, ainsi que dans une cristallerie de la Guillotière, à Lyon, où fonctionnait une machine fixe de ce système.

Un officier de marine, M. Lafont, substitua le chloroforme à l'éther; mais si la vapeur de cette dernière substance n'est point inflammable, elle est asphyxiante; de plus, l'expérience a montré que sous son action, les garnitures des pistons étaient promptement détériorées. Les essais dont nous parlons ont été faits sur la machine du *Galilée*. On a employé aussi des vapeurs combinées d'eau et de sulfure, ou de chlorure de carbone.

Une autre machine fort intéressante, que nous avons vue fonctionner à l'Exposition universelle de 1867, est la machine à ammoniaque de M. Frot, ingénieur de la marine.

A l'eau de la chaudière M. Frot substitue une dissolution ammoniacale. On sait qu'à la température ordinaire de 15°, l'eau dissout 750 fois environ son volume de gaz ammoniac, et que, si on la chauffe jusqu'à 100°, le gaz dissous s'évapore entièrement : il n'en reste plus trace dans l'eau de dissolution. C'est sur cette double propriété que M. Frot s'est appuyé pour construire sa machine, les expériences qu'il fit sur la tension du liquide à diverses températures lui ayant prouvé que cette tension, qui est déjà, à 100°, de 7 atmosphères et demie, atteint 10 atmosphères à 120°. Mais il fallait, pour rendre pratique et économique l'emploi de la force élastique des vapeurs ammoniacales, résoudre deux problèmes : le premier consistait à condenser la vapeur à sa sortie du cylindre, de manière à obtenir une différence de pression suffisamment considérable; le second, à régénérer la dissolution ammoniacale, en se servant le plus longtemps possible du même liquide.

C'est à quoi M. Frot est parvenu sans modifier essentiellement les dispositions des machines à vapeur ordinaires. Au

sortir du cylindre, les gaz, après avoir exercé leur action sur le piston moteur (ils sont alors formés d'un mélange de 1 partie de vapeur d'eau et de 5 parties de gaz ammoniac), sont dirigés dans un condenseur *à surface* formé d'une triple série de tubes qu'entoure un courant continu d'eau froide. Pour rendre la condensation plus prompte, le jeu d'une pompe injecte dans la chambre qui sépare les deux premières rangées de tubes une dissolution ammoniacale à basse température non saturée, laquelle est elle-même prise dans la chaudière. Du condenseur, les gaz refroidis et en partie dissous arrivent dans un réservoir qu'on nomme *dissoluteur tubulaire*. Là ils achèvent de se dissoudre au contact d'une dissolution ammoniacale non saturée, et sont ramenés par une pompe alimentaire dans la chaudière. Dans ce dernier trajet, la dissolution régénérée chemine à travers des serpentins plongés dans le liquide qui, comme on vient de le dire, sert à l'injection. Elle prend à ce dernier la chaleur qu'il possède, ce qui est doublement utile, puisque la dissolution d'alimentation rentre plus chaude dans le générateur, et que la dissolution d'injection arrive au contraire plus froide au condenseur.

Les vapeurs ammoniacales attaquant le cuivre, il faut remplacer par du fer forgé toutes les pièces de bronze des machines ordinaires. Les expériences faites ont prouvé que la machine à ammoniaque offre sur les machines à vapeur d'eau divers avantages : outre l'économie de combustible, qui paraît assez considérable, et la rapidité de la mise en pression, il faut compter l'absence presque complète d'incrustation des chaudières, puisque le même liquide fonctionne longtemps, et que, d'ailleurs, l'ammoniaque préserve les parois des causes d'oxydation. Mais le principal inconvénient est, comme pour les machines à vapeurs combinées, la difficulté de s'opposer aux fuites du gaz, et le danger qui résulte d'un mélange avec l'air ambiant d'une substance dont l'action sur les organes respiratoires est si dangereuse.

§ II — Les Machines a air chaud

Dans les machines que nous venons de décrire, c'est la combinaison de la vapeur d'eau avec celle d'un liquide plus volatil, ou avec un gaz que la chaleur force à se dégager de sa dissolution, qui est le moteur employé. La vapeur d'eau y joue donc toujours un rôle important. On a essayé de lui substituer une force élastique entièrement distincte, celle qu'on obtient en échauffant un gaz permanent comme l'air, ou en enflammant un mélange gazeux explosif. De là deux nouvelles espèces de machines motrices, les *machines à air chaud* et les *machines à gaz*. Ce sont d'ailleurs toujours des machines thermiques, car c'est toujours à la chaleur qu'est emprunté le travail mécanique qu'elles utilisent.

Les premiers essais ayant pour objet d'employer comme force motrice l'air dilaté par la chaleur remontent, paraît-il, à Montgolfier. L'un des inventeurs de la photographie, J. Niepce, s'occupa aussi du même problème. Mais, dès 1816, Robert Stirling construisait une machine à air chaud qui, d'après un juge compétent en ces matières, E. Verdet, est « à la fois la plus simple en théorie et la plus éprouvée par l'expérience ».

Depuis, un ingénieur suédois, Ericson, conçut et fit exécuter une machine à air chaud qui fonctionna sur un navire américain en 1853. Voici en quels termes M. Collignon définit le principe du nouveau moteur :

« Dans sa première machine, le capitaine Ericson plaçait un *régénérateur*, formé d'un grand nombre de toiles métalliques, sur le chemin de l'air échauffé qui sortait du cylindre moteur, quand le piston prenait son mouvement rétrograde. Le cylindre moteur était chauffé directement par le foyer. Il transmettait son mouvement à un *cylindre alimentaire*, véritable pompe qui prenait l'air dans l'atmosphère et le comprimait dans un

réservoir; de là l'air venait sous le piston moteur en traversant les toiles métalliques, où il s'échauffait aux dépens de la chaleur abandonnée par l'air chaud précédemment expulsé. »

Ericson a modifié depuis la machine à air chaud dont il est l'inventeur. Il a supprimé les toiles métalliques, et l'air chaud, après avoir exercé son action sur le piston moteur, est rejeté directement dans l'atmosphère : c'est donc une machine à simple effet, et, pour la mettre en train, il faut d'abord donner à la main le mouvement au volant. La machine Laubereau, que nous allons décrire, est, sous ce dernier rapport, semblable à la machine d'Ericson et en fera comprendre le mécanisme. Rien, d'ailleurs, n'est plus simple.

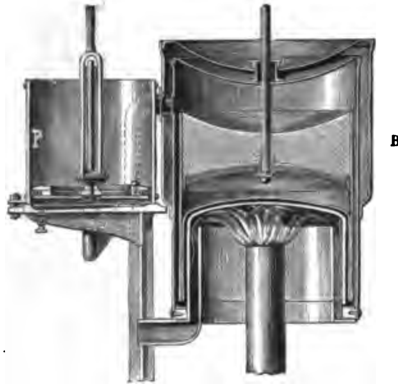


Fig. 310. — Coupe des cylindres dans la machine Laubereau.

Le mécanisme moteur de la machine Laubereau se compose de deux cylindres métalliques A, B, d'inégal diamètre. dont les capacités intérieures communiquent ensemble par un tube *t*. Dans le premier, qui est ouvert à sa partie supérieure, se meut un piston plein *p*, qui remplit hermétiquement le cylindre et s'oppose à toute communication de la capacité interne avec l'air extérieur. C'est le *cylindre* et le *piston moteurs* de la machine.

Le grand cylindre B est complétement fermé par ses deux fonds supérieur et inférieur, tous deux de forme concave. Un piston épais P, formé d'une substance mauvaise conductrice de la chaleur, de plâtre, par exemple, se meut également dans le cylindre, mais sans en toucher les parois : il est de forme doublement concave, de manière à pouvoir également s'adapter sur l'un et sur l'autre fond du cylindre. C'est ce qu'on peut appeler le *cylindre alimentaire*, parce que c'est l'air qu'il contient qui, alternativement échauffé et refroidi, va exercer son

action sur le piston moteur, où au contraire cesse cette action à chaque période de mouvement.

Pour obtenir ces effets successifs, un foyer de chaleur (ici c'est un bec de gaz), échauffe extérieurement la concavité du fond inférieur du grand cylindre, et, par suite, l'air qui est sous



FIG. 311. — Machine à air chaud de Laubereau.

le piston P. La pression de cet air surpasse donc la pression atmosphérique, et, dès lors, poussant par-dessous le piston p, lui donne un mouvement ascensionnel qui se communique par le mécanisme ordinaire à l'arbre et au volant de la machine. Le piston P redescend alors, et vient s'appliquer sur le fond inférieur, de manière à intercepter toute communication de la

chaleur du foyer avec l'air qu'il contient. Ce dernier se trouve au contraire en contact direct avec le fond supérieur du grand cylindre, qui est double et où circule un courant continu d'eau froide. L'air refroidi se condense; sa force élastique diminue. La pression atmosphérique reprend le dessus, et le piston moteur redescend, pendant qu'au contraire le piston de plâtre remonte, et laisse de nouveau l'air s'échauffer.

Cette période se reproduit indéfiniment et donne à la machine son activité continue. Une pompe, que fait fonctionner l'arbre moteur, amène constamment dans le double fond du grand cylindre l'eau froide nécessaire à la réfrigération de l'air qui vient d'agir, et enlève celle qui s'échauffe quand cet air cède sa chaleur aux parois.

Les machines à air chaud, comme toutes les machines thermiques à gaz, différentes de la machine à vapeur proprement dite, sont avantageuses pour la petite industrie, qui n'a besoin que de forces motrices assez faibles et pouvant être souvent interrompues. La facilité de la mise en train les rend, sous ce rapport, économiques; mais elles ne le seraient plus pour des forces motrices considérables agissant continûment, comme dans les grandes usines.

L'air chaud a bien, sur la vapeur d'eau, un avantage : c'est qu'entre des limites éloignées de température, on a des pressions beaucoup moindres; la quantité de chaleur emmagasinée, et par suite de travail, peut donc être fort grande, sans qu'on ait à craindre le défaut de résistance des enveloppes des chaudières; mais aussi, pratiquement, si l'on a besoin d'une grande force motrice, il faut augmenter beaucoup la surface des pistons. D'autre part, à de hautes températures, l'air chaud brûle les garnitures des pistons, oxyde et détériore les surfaces métalliques avec lesquelles il est en contact. La vapeur d'eau n'a pas ces inconvénients.

§ III — Les Machines a gaz

Arrivons maintenant à d'autres moteurs que l'on commence à employer assez fréquemment aussi dans les petites industries : nous voulons parler des *machines à gaz*.

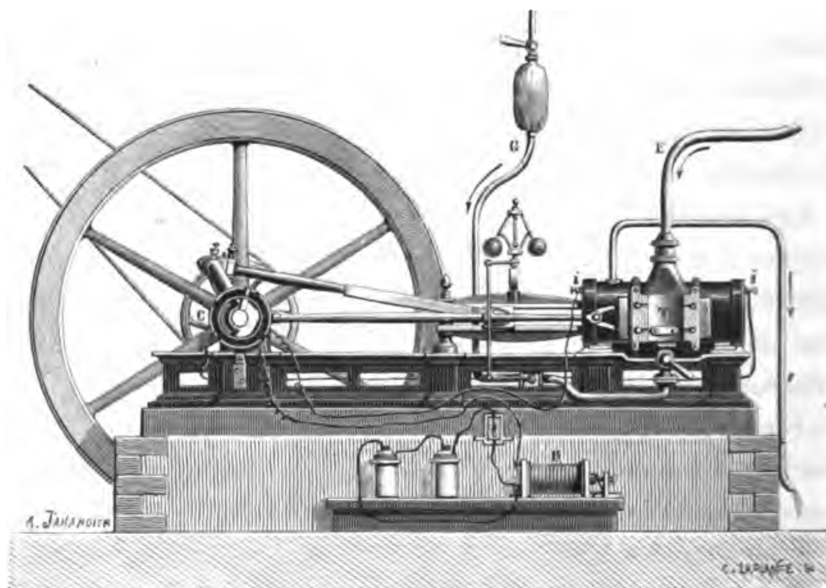


Fig. 312. — Moteur à gaz du système Lenoir.

C'est bien encore l'air dilaté qui fournit la force motrice de ces machines; mais, au lieu d'être dilaté par l'action d'une source de chaleur entretenue sous la capacité qui le contient, il l'est par l'effet du dégagement de chaleur que produit l'inflammation spontanée d'un mélange détonant. Ce mélange est formé d'air et de gaz d'éclairage en proportions convenables.

Les différentes manières de produire cette inflammation ont donné lieu à des machines à gaz de dispositions variées. Citons seulement le moteur Lenoir, où le mélange explosif, formé de 90 parties d'air et de 10 parties de gaz, est enflammé par

les étincelles successives d'une bobine d'induction; le moteur Hugon, où c'est un bec de gaz mobile qui met le feu au mélange; et enfin la machine Otto et Langen, où l'inflammation est déterminée aussi par un bec allumé, mais fixe. Examinons rapidement les dispositions essentielles de chacun de ces moteurs.

Le moteur Lenoir ne diffère des machines à vapeur, au point de vue de l'aspect extérieur, que par l'absence de chaudière et la disposition particulière du mécanisme de distribution.

Le cylindre moteur est un corps de pompe de grand diamètre, posant horizontalement sur le socle de la machine, et la tige donne le mouvement, par une bielle et une manivelle, à l'arbre muni, d'un côté d'une poulie motrice, de l'autre côté d'un volant. Latéralement, le cylindre est flanqué de deux tiroirs T mus par des excentriques; l'un d'eux sert à introduire alternativement des deux côtés du piston le mélange explosif d'air et d'hydrogène qui arrive par le piston G; l'autre tiroir sert à faire échapper les produits de la combustion.

Sur le bâti de la machine est installée une bobine de Ruhmkorff R, alimentée par une pile de Bunsen. C'est elle qui fournit les étincelles successives destinées à enflammer le mélange gazeux dans chacune des chambres du cylindre. Pour cela, les fils de l'hélice induite viennent aboutir chacun en *ii*, à l'un des fonds métalliques du cylindre, où ils pénètrent par une tige isolante de porcelaine : l'étincelle jaillit entre le piston et ce fil de platine. Le mélange explosif qui arrive au même instant dans la chambre, grâce au mouvement du tiroir, s'enflamme successivement. C'est la chaleur résultant de ces explosions successives qui se communique à l'air, et, le dilatant, fournit la force motrice. En même temps l'autre tiroir fait échapper les gaz provenant de la combustion qui a eu lieu dans l'autre chambre. De là le mouvement alternatif du piston et celui de l'arbre et du volant.

Comme les parois du cylindre s'échauffent à chaque explosion, elles sont, pour éviter la température élevée qui en serait

bientôt la conséquence, entourées d'un manchon dans lequel circule d'une façon continue un courant d'eau froide; ce courant arrive par le tube E et sort par le tube *e*.

Le moteur Hugon diffère surtout, nous l'avons dit, du moteur Lenoir, par le mode d'inflammation du mélange gazeux. Au lieu d'étincelles d'induction, c'est un bec de gaz qui est alternativement amené, par le mouvement même de la machine, en contact avec le gaz, ou en est éloigné.

Sous ce rapport, la machine à gaz d'Otto et Langen ressemble au moteur Hugon; mais elle se distingue de ce dernier, ainsi que du moteur Lenoir, par un point essentiel. C'est une machine à simple effet, et ce n'est plus la force du gaz échauffé et dilaté qui sert de force motrice, mais bien la pression atmosphérique. En un mot, le principe de son mouvement est analogue à celui des premières machines à vapeur, des machines de Newcomen.

La planche XIX en montre la disposition d'ensemble.

Dans la colonne qui porte à son sommet les organes de transmission, se trouvent renfermés le cylindre et le piston moteur. Le cylindre est ouvert par en haut, et c'est seulement dans la chambre inférieure au piston qu'arrive le gaz inflammable. Un bec de gaz, qui est constamment allumé, est logé dans une cavité située latéralement à la partie inférieure du cylindre: on voit ce bec sur la figure. Quand la communication est établie entre ce bec et l'espace qui renferme le gaz détonant, ce qui se fait à l'aide du mouvement d'une plaque que commande une tige à excentrique calée sur l'arbre, l'inflammation a lieu : le mélange s'échauffe et se dilate brusquement sous le piston, qui est soulevé jusqu'au haut du cylindre. Cette partie du mouvement n'est point utilisée, et la tige du piston remontant, qui s'engrène comme une crémaillère à une roue dentée calée sur l'arbre, fait tourner cette roue comme poulie folle. Quand le piston redescend sous l'action prédominante de la pression atmosphérique, sa tige et la roue d'engrenage font tourner l'arbre et le volant : c'est la phase motrice proprement dite.

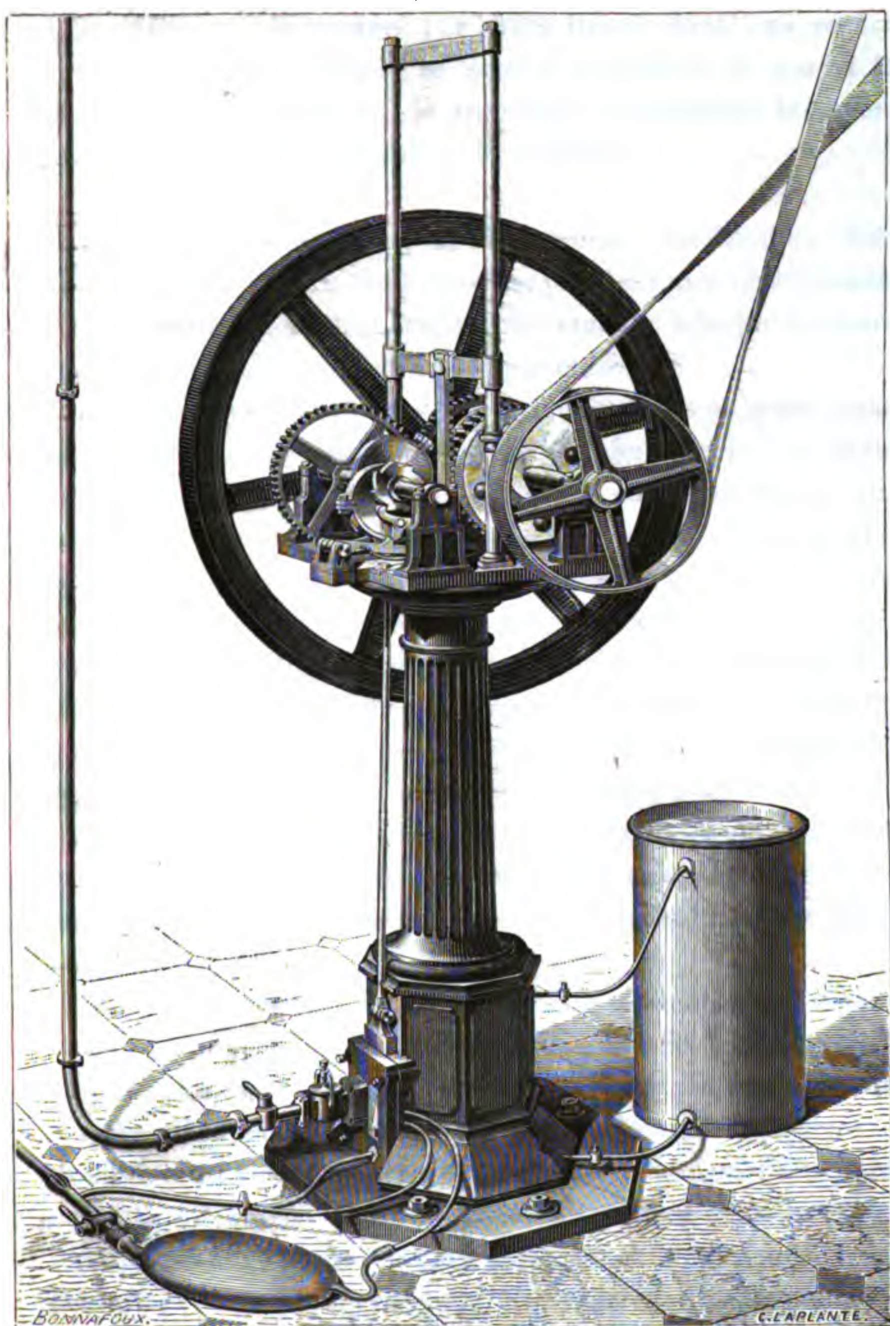


PLANCHE XIX — MACHINE A GAZ D'OTTO ET LANGEN

On voit, à gauche de la figure, un tube qui amène le gaz d'éclairage : il se termine par trois tubes, dont l'un sert à alimenter le bec allumé, le second à fournir du gaz à la chambre de distribution, le troisième à introduire le même gaz au-dessous du piston dans le cylindre.

Terminons cette description des moteurs thermiques, dont l'invention est encore toute récente, par quelques observations sur leurs avantages et sur leurs inconvénients, tels que les fournissent à la fois la théorie et l'expérience.

Au point de vue théorique, les machines à gaz ou à air chaud (elles ont au fond le même principe) auraient sur les machines à vapeur cet avantage, nous l'avons dit en commençant, que la température du gaz peut atteindre une valeur beaucoup plus élevée, tout en ne donnant qu'une pression assez faible. Comme le travail mécanique ne dépend que de l'écart entre les températures extrêmes, il s'ensuit qu'on peut utiliser une portion plus grande de travail sans avoir à craindre les accidents d'explosion : avec une puissance aussi forte, les parois des organes peuvent être moindres; mais, d'autre part, nous avons vu aussi que les températures élevées des gaz ont un effet destructeur sur les garnitures et sur les pièces métalliques. L'avantage se trouve donc en grande partie détruit par ce grave inconvénient.

Mais les machines à gaz offrent sur les moteurs à vapeur d'eau une supériorité incontestable au point de vue de la sécurité : elles sont à peu près à l'abri de toute explosion, de toute crainte d'incendie. Leur mise en mouvement est facile et prompte : un simple robinet ouvert ou fermé permet leur mise en train ou l'arrêt de la machine. N'ayant ni foyer ni chaudière, elles sont moins encombrantes, et exigent, pour le fonctionnement et la surveillance, un personnel beaucoup plus restreint.

Économiquement parlant, elles sont au contraire inférieures aux machines à vapeur. Il résulte en effet, d'expériences faites

par M. Tresca sur le moteur Lenoir, que la consommation du gaz s'élève de 2500 à 3000 litres par force de cheval et par heure : c'est cinq ou six fois la dépense de la machine à vapeur en combustible. Ce moteur exige d'ailleurs une forte dépense d'eau pour le refroidissement du cylindre et du piston moteur. La machine à gaz Otto et Langen est beaucoup plus bruyante que la machine Lenoir, qui l'est cependant déjà : les mouvements brusques du piston doivent y être une cause de détérioration rapide. Tous les moteurs à gaz ont d'ailleurs cet inconvénient, qu'ils ne peuvent s'installer que là où existent des usines productrices de ce gaz même, et c'est dans ces usines alors qu'on retrouve les inconvénients des machines à vapeur. Mais si on ne les considère que comme des moteurs d'un usage restreint, c'est-à-dire applicables à la petite industrie, où la force motrice utile ne dépasse point quelques chevaux-vapeur, alors ils reprennent leur supériorité, même au point de vue économique relatif. Ils peuvent se concilier en effet avec toutes les exigences des arrêts et des reprises fréquents du travail, et la dépense cesse aussitôt; tandis que les moteurs à vapeur, une fois allumés et en train, consomment toujours pendant ces interruptions. A ce point de vue, les machines à air chaud et à gaz offrent un véritable intérêt : elles rendront de grands services, si d'ailleurs, comme il est probable, elles reçoivent des perfectionnements comparables à ceux qu'a reçus la machine à vapeur.

LIVRE V

LE MAGNÉTISME ET L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER

LA BOUSSOLE

§ I — Boussole de déclinaison — Ses usages

Bien avant que l'on connût les lois des phénomènes magnétiques, on se servait de la boussole pour naviguer loin des côtes, quand le ciel, masqué par les nuages ou les brumes, ne donnait plus aucune indication astronomique de la direction que devaient suivre les navires en mer. C'est un des exemples les plus frappants d'une application des phénomènes de la physique précédant de très-loin la découverte des lois ou de la théorie. « Mille ans et plus avant notre ère, dit Humboldt, à l'époque si obscure de Codrus et du retour des Héraclides dans le Péloponèse, les

Chinois avaient déjà des *balances magnétiques*, dont un des bras portait une figure humaine qui indiquait constamment le sud; et ils se servaient de cette boussole pour se diriger à travers les steppes immenses de la Tartarie. Déjà, au IIIe siècle de notre ère, c'est-à-dire sept cents ans au moins avant l'introduction de la boussole dans les mers européennes, les jonques chinoises naviguaient sur l'océan Indien d'après l'indication magnétique du sud. »

Les *chars indicateurs du sud*, dont parle Humboldt, consistaient en une petite statuette tournant sur un pivot vertical; l'un des bras étendu se tournait vers le sud, parce qu'il renfermait une aiguille aimantée dont le pôle boréal était vers la main, tandis que le pôle nord ou austral était vers l'épaule. Plus tard, au IIe siècle, la boussole chinoise avait une autre disposition qui, des Arabes, fut transmise aux navigateurs européens, à l'époque des premières croisades : c'était une aiguille aimantée posée sur un flotteur. Ce n'est guère que vers la première moitié du XIVe siècle, que cet instrument, si utile à la navigation, si précieux aujourd'hui pour l'étude de la physique du globe, reçut un perfectionnement nouveau, et que l'aiguille aimantée de la boussole fut suspendue sur un pivot.

Sans nous arrêter plus longtemps à l'histoire de la boussole et de ses applications à la navigation, aux arts et aux sciences, rappelons rapidement les lois de l'orientation magnétique, et décrivons les appareils tels qu'ils sont aujourd'hui employés à ces divers usages.

Une aiguille aimantée, librement suspendue par son centre de gravité et pouvant osciller dans tous les sens autour de ce point, prend, quand elle est en équilibre, une position qui fait, avec la méridienne et avec la verticale du lieu, deux angles : le premier se nomme angle de déclinaison ou simplement *déclinaison magnétique*; le second est l'*inclinaison magnétique*. De là deux espèces de boussoles, selon qu'il s'agit de déterminer l'un ou l'autre de ces deux éléments physiques.

Boussole de déclinaison.— Quand il s'agit d'une détermination

scientifique nécessitant une précision aussi rigoureuse que possible, la boussole de déclinaison est construite comme l'indique la figure 313. L'aiguille aimantée est suspendue sur un pivot d'agate et enfermée dans une boîte cylindrique M, qui porte, à l'aide de deux montants métalliques, une lunette LL′ munie de fils réticulaires à son foyer et mobile elle-même autour d'un axe *aa′* parallèle au plan du limbe. Tout ce système peut lui-même tourner horizontalement sur le plan d'un autre cercle divisé PQ.



FIG. 313. — Boussole de déclinaison.

Pour mesurer la déclinaison, on place la boussole sur un plan à peu près horizontal, et l'on s'assure de la parfaite horizontalité des limbes M et PQ, en observant le niveau à bulle d'air NN. Cela posé, on vise avec la lunette une étoile connue, et, d'après l'heure de l'observation, on peut calculer l'angle que fait le plan vertical de l'étoile ou de la lunette, avec la ligne méridienne, ce qu'on nomme son azimut. Dès lors la direction de la méridienne est fixée sur le limbe PQ ; on fait tourner le limbe sur le cercle PQ d'une quantité égale à cet angle : la ligne de visée *n s*, ou 0°-180°, est alors dans le méridien, et il ne reste plus qu'à lire sur le limbe M l'angle que fait avec elle la direction de l'aiguille aimantée. Cet angle est la *déclinaison magnétique* du lieu au moment de l'observation.

C'est la même méthode d'observation qu'on emploie pour mesurer la déclinaison au moyen de la boussole de Gambey (fig. 314). Seulement cet instrument permet d'obtenir l'élément en question avec une précision encore plus grande. L'aiguille est ici un barreau aimanté AB, dont les extrémités sont munies

de deux anneaux à fils croisés servant de repères. Ce barreau, qu'un étrier supporte en son milieu, est suspendu, par un faisceau *f* de fils de soie sans torsion, à un treuil mobile : sous l'influence de l'action magnétique du globe terrestre,

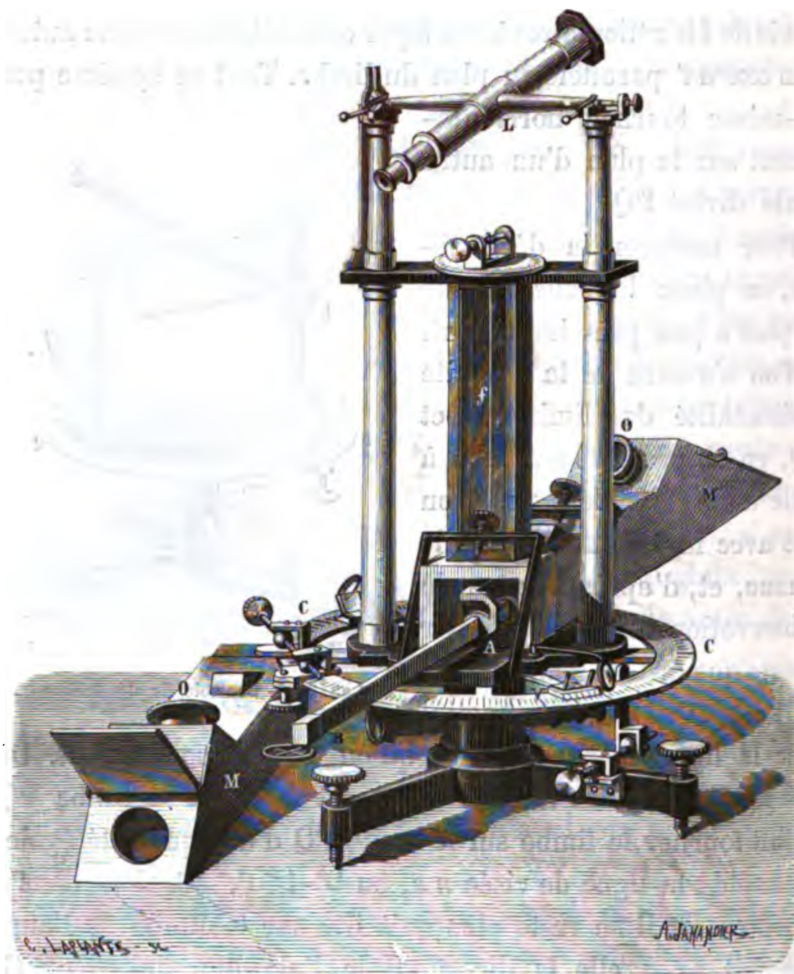


Fig. 314. — Boussole de déclinaison de Gambey.

il va prendre, après quelques oscillations, une direction fixe qui est celle du méridien magnétique dans le lieu et au moment de l'observation. Toute la question consiste à déterminer, avec toute la précision possible, l'angle que fait alors le barreau aimanté avec la méridienne géographique du lieu. Le

cadre soutenant le treuil porte en même temps une lunette L, qui remplit le même office que celle de la boussole décrite plus haut. Le cadre qui la supporte, et qui supporte aussi le fil de suspension et le barreau, peut tourner sur le plan d'un limbe divisé CC, muni de verniers à l'aide desquels on lit les divisions qui correspondent, soit à la position de la lunette, et par conséquent à celle du plan vertical de l'étoile observée, soit à la position du plan vertical qui contient l'axe du barreau

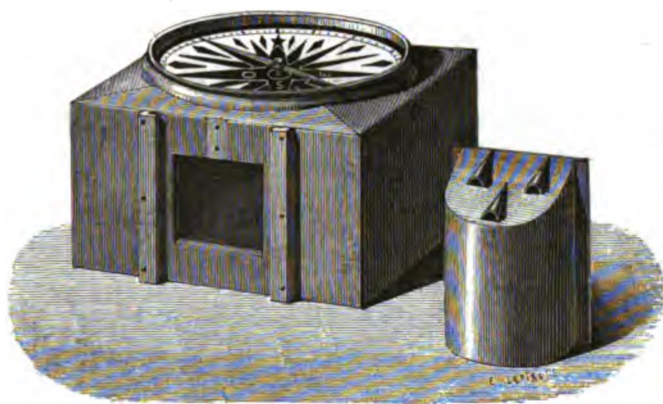


FIG. 315. -- Compas de route, ou boussole marine.

aimanté. Pour éviter l'influence des agitations de l'air, le fil de soie est enfermé dans une boîte garnie de glaces, et une autre boîte MM renferme le barreau, dont on observe alors les extrémités par les ouvertures OO.

La boussole de déclinaison sert fréquemment aux navigateurs, en leur fournissant un des éléments nécessaires à la direction de la route des navires en mer, c'est-à-dire l'angle que fait l'axe du vaisseau avec le méridien du lieu où il se trouve. Dans la navigation par estime, l'autre élément qu'on détermine au moyen de l'instrument appelé *loch*, est la vitesse du navire.

La boussole prend alors, dans le langage des marins, le nom de *compas de route*. On l'installe à demeure, à l'arrière, à proximité du gouvernail, dans une sorte de boîte ou d'armoire qu'on

appelle l'*habitacle*. L'habitacle est le plus souvent divisé en trois compartiments : un au milieu, contenant une lampe qui sert aux observations de nuit, les deux autres renfermant chacun une boussole, de manière à permettre un contrôle immédiat.

Dans le compas de route, l'aiguille aimantée repose sur un

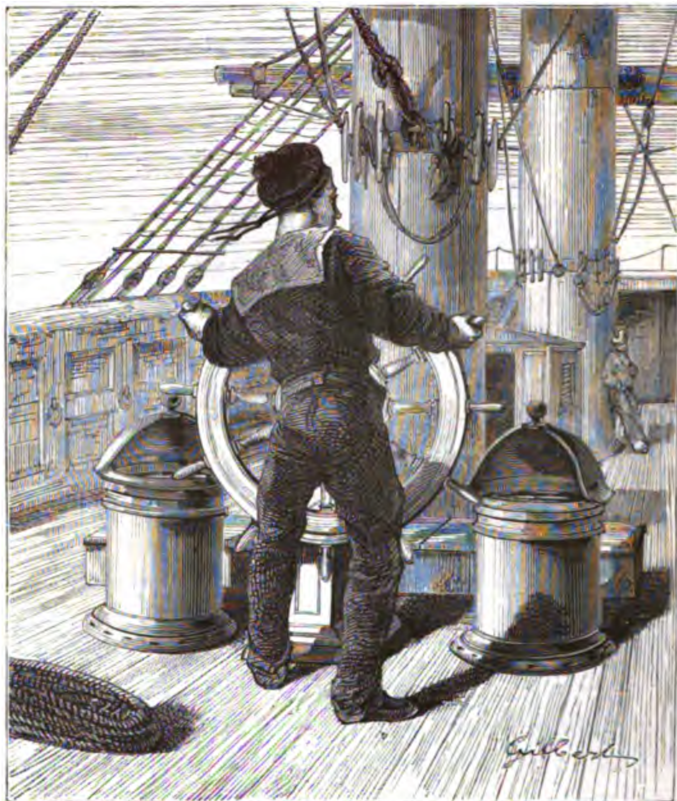


FIG. 316. — L'habitacle sur un navire de guerre.

pivot, au centre de la *cuvette* ou cylindre de cuivre ; elle porte un disque léger, sur lequel est tracée une rose des vents, et qui, en outre, rend les oscillations de l'aiguille moins fortes. La cuvette, lestée par une masse de métal, est elle-même portée par l'habitacle à l'aide d'une *suspension à la Cardan*, de sorte que le plan du limbe reste horizontal, quels que soient les mouvements du navire. Un trait ou une étoile marque sur la cuvette,

sur le bord d'avant, la direction de la quille ou de l'axe du navire : ce point est ce qu'on nomme le *cap du compas*.

On peut donc à chaque instant lire, sur la rose des vents, l'angle que fait l'aiguille aimantée avec le *cap du compas*. En ajoutant à cet angle la déclinaison magnétique, ou en la retranchant du même angle, suivant les cas, on trouvera pour résultat l'orientation du navire [1].

On se sert aussi, dans la marine, d'une boussole qui a pour objet précisément de déterminer la déclinaison magnétique par une opération entièrement semblable à celle décrite plus haut.



FIG. 317. — Compas de variation ou boussole de relèvement.

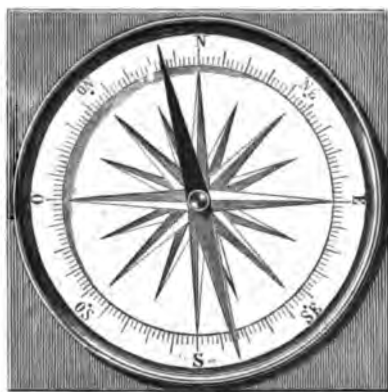


FIG. 318. — Boussole de déclinaison portative.

On observe un astre connu, on mesure son angle azimutal, ce qui donne la direction de la méridienne, et l'on en conclut la déclinaison. La boussole prend alors le nom de *compas de*

1. L'emploi du compas de route pour la navigation ou les explorations terrestres suppose, ainsi qu'on vient de le voir, la connaissance de la valeur de la déclinaison magnétique dans les lieux où observe le marin ou le voyageur, mais il faut surtout qu'il n'existe point, à côté de lui, de perturbations propres à le jeter dans une erreur d'autant plus grave qu'il s'en croirait plus à l'abri. Aujourd'hui que le nombre de navires dont la coque est de fer, ou qui sont revêtus d'une cuirasse de même métal, va en croissant, une pareille cause d'erreur existe en effet sur le navire même, et il paraît certain que la déviation de l'aiguille aimantée sur les vaisseaux ainsi construits a été la principale cause de sinistres nombreux. Quand on rive les boulons d'une coque de fer, on développe un magnétisme puissant, on déter-

variation. Elle est portative, comme la boussole de la figure 313, et n'en diffère essentiellement qu'en ce que la lunette est remplacée par une alidade concentrique, à pinnules P, P′, diamétralement opposées. La boîte portant l'aiguille aimantée, avec limbe divisé, est suspendue à la Cardan. Deux fils croisés à angle droit sont tendus sur le bord de la boîte qui contient l'aiguille, et l'un d'eux donne la direction des fentes des pinnules, et par conséquent celle du plan de visée. L'une des pinnules porte à 45° un miroir où l'observateur voit se réfléchir l'arc et les divisions correspondantes du limbe, en même temps qu'il voit l'astre au travers des fentes des pinnules et d'un trait du miroir où le tain a été enlevé.

Pendant qu'un observateur vise l'astre, étoile, lune, soleil, ou un objet terrestre, et lit dans le miroir la division qui marque l'angle de l'aiguille aimantée avec le vertical de l'objet visé, un autre observateur fait une seconde lecture à l'aide du fil qui est tendu à angle droit sur la direction des pinnules ; cette seconde lecture sert de contrôle à la première. Avec cet instrument, on ne peut guère viser que des objets peu élevés au-dessus de l'horizon, au maximum de 15° à 20°.

On installe quelquefois le compas de variation sur une plate-forme, au-dessus du dôme de l'escalier de l'arrière.

Les voyageurs, dans leurs explorations géographiques continentales, les géologues qui veulent connaître la direction des chaînes de montagnes ou des autres accidents du sol, emploient la boussole comme les marins. Seulement, comme l'instrument est plus facile à installer dans une situation fixe, il n'exige point un mode de suspension aussi complexe ; il suffit d'un pied à trois

mine la formation d'un aimant, dont la direction dépend de celle de l'axe du navire en construction. Ce magnétisme agit sur l'aiguille aimantée de la boussole installée ensuite à l'arrière, et cette action produit une déviation qu'il faut ou calculer ou définir, pour éviter les erreurs d'observation. L'installation d'une boussole-type en un autre point du navire permet de faire la correction nécessaire ; on emploie aussi un moyen qui consiste à placer en des endroits convenables des barres de fer doux ou des aimants susceptibles de détruire la déviation. Malheureusement, il arrive que, pendant le voyage, le magnétisme propre au navire change de direction et d'intensité, et alors on risque d'autant plus, qu'on se croit davantage en sûreté.

Il y a là un problème fort intéressant, dont la solution est à l'étude.

branches auquel la boussole est fixée par un genou à coquilles, et d'un niveau à bulle d'air pour s'assurer de l'horizontalité du limbe. Une petite lunette à fils réticulaires, qui se meut parallèlement à la ligne de foi dans un plan vertical, permet de viser dans la direction de la ligne qu'il s'agit d'orienter. Les boussoles plus simples portent, au lieu de lunette, une alidade à pinnules.

Puisque la boussole permet de trouver rapidement, quand la déclinaison magnétique d'un lieu est connue, l'angle d'une ligne avec la méridienne ou son orientation, il est clair, que si l'on a déterminé de la sorte les angles azimutaux d'une série de lignes horizontales, par exemple ceux des côtés d'un polygone, on n'aura plus qu'à faire la différence entre ces angles, pour obtenir les angles que les lignes font elles-mêmes entre elles. Bien plus, si l'on n'a en vue que la détermination des angles du polygone, elle s'obtiendra de la même façon, sans qu'on ait besoin de connaître la déclinaison magnétique. Il suffit que, pendant l'opération, la direction de l'aiguille aimantée reste constante, ce qui est vrai dans une mesure suffisante, pendant la durée ordinaire des opérations topographiques. Tel est le principe qui préside à l'emploi de la boussole dans l'arpentage. Mais la mesure des angles par ce procédé n'est plus assez exacte, quand on veut pouvoir répondre de plus d'un demi ou d'un quart de degré; l'oscillation de l'aiguille, qui rend difficile la lecture de l'angle, les variations diurnes de la déclinaison parfois assez considérables, sont les causes principales de ce défaut de précision.



FIG. 319. — Boussole des géomètres.

On a construit, pour les reconnaissances militaires, des boussoles qui ne donnent pas même l'approximation dont nous parlons, par la raison toute simple qu'à une installation fixe de l'instrument est substituée l'observation à la main. Nous ne citons que pour mémoire ces applications de la boussole de déclinaison.

§ II — Boussoles d'inclinaison. — Magnétisme terrestre.

Les boussoles d'inclinaison ont pour objet la mesure de l'angle que l'aiguille aimantée fait avec la verticale du lieu. Comme cet élément n'est susceptible d'application que dans les recherches de physique du globe, nous allons nous borner à décrire succinctement la boussole d'inclinaison telle qu'elle est adoptée dans les observatoires magnétiques.



Fig. 320. — Boussole d'inclinaison.

Un cercle métallique divisé, au centre duquel l'aiguille aimantée est suspendue et peut librement tourner dans le plan du limbe; un autre cercle, pareillement divisé, et qui est supporté par un pied à trois branches munies de vis calantes : telles sont les deux pièces principales de l'appareil que représente la figure 320. A l'aide d'un niveau à bulle d'air, on peut placer le second cercle dans un plan parfaitement horizontal. Alors le premier cercle, dont le plan est perpendiculaire au premier, est vertical. Il peut d'ailleurs tourner avec son support autour de l'axe de l'instrument, ce qui permet d'amener l'aiguille à coïncider avec le méridien magnétique; une alidade mobile

avec le support sert à fixer cette position[1]. Dans cette position, l'aimant reste, après quelques oscillations, incliné sur la verticale d'un angle qu'on peut lire sur le cercle gradué : c'est cet angle qui mesure l'inclinaison magnétique dans le lieu et au moment de l'observation.

Il nous reste à dire quelques mots d'une application importante des boussoles de déclinaison et d'inclinaison : nous voulons parler de la détermination scientifique de ces deux éléments et de leurs variations diurnes, annuelles ou séculaires dans les divers points de la surface de la Terre. C'est une recherche d'un grand intérêt, qui est en même temps d'une utilité extrême pour la navigation et la géographie.

L'étude magnétique de la surface du globe terrestre a montré que la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité changent d'un lieu à l'autre d'une façon à peu près continue, mais très-irrégulière, eu égard aux positions géographiques. Pour représenter cet état à une époque donnée, Humboldt a eu l'heureuse idée de figurer sur les globes ou cartes terrestres trois séries de lignes : les *lignes isogoniques* sont des courbes joignant tous les points qui ont une même déclinaison orientale, ou une même déclinaison occidentale ; les *lignes isocliniques* indiquent pareillement les lieux de la terre où l'inclinaison magnétique, soit boréale, soit australe, est la même ; enfin, une troisième série se compose des *lignes isodynamiques*, c'est-à-dire de la suite des points du globe où l'intensité de la force du magnétisme terrestre a la même valeur. Les unes et les autres sont représentées dans la planche XX et distinguées par diverses couleurs.

Il résulte de l'examen de ces lignes qu'il existe, aux environs des deux pôles géographiques terrestres, deux points où convergent les lignes isogoniques, et qui sont les centres communs des

1. On pourrait trouver cette position, si l'on adaptait à l'appareil une boussole de déclinaison. Mais ce soin est inutile, car il suffit de chercher la position du limbe vertical, pour laquelle l'aiguille en équilibre reste verticale. Le méridien magnétique est à 90° de cette position. En faisant tourner le limbe vertical à 90°, on est assuré de la placer dans le méridien magnétique.

courbes isocliniques et isodynamiques. Ce sont les pôles magnétiques du globe. En ces deux points, la boussole de déclinaison est indifférente, tandis que l'aiguille de la boussole d'inclinaison s'y maintient dans une direction constamment verticale. Quant aux lignes isogoniques, non-seulement elles ne coïncident pas avec les méridiens géographiques, mais il faut les distinguer aussi des méridiens magnétiques. Parmi elles, deux sont remarquables : ce sont les lignes où la déclinaison est nulle ; on peut les regarder comme le prolongement l'une de l'autre : l'une traverse le continent américain de la mer d'Hudson à la Caroline du Sud, de l'embouchure des Amazones à Rio de Janeiro ; l'autre, moins régulière, coupe l'Australie, s'incurve à l'ouest de l'Hindoustan, et remonte par le golfe Persique, la mer Caspienne, l'Oural, jusqu'à la mer Blanche. Deux lignes sans déclinaison partagent le globe en deux parties ; celle qui renferme l'Europe et l'Afrique a toutes ses déclinaisons magnétiques occidentales, tandis que dans l'autre elles sont orientales. Il existe en Asie une portion elliptique isolée d'une ligne sans déclinaison qui enveloppe un espace dans lequel la déclinaison est occidentale.

L'équateur magnétique est la suite des points où l'aiguille de la boussole d'inclinaison reste horizontale, pour lesquels, par conséquent, l'inclinaison est nulle. Elle ne coïncide pas non plus avec l'équateur terrestre, qu'elle coupe en trois points : dans le golfe de Guinée, en un point de l'océan Pacifique ayant pour longitude occidentale 175° ou 180° environ, et enfin un autre dans la mer de Polynésie, vers 135°. Les lignes isocliniques suivent à peu près les contours de l'équateur magnétique, différant ainsi très-sensiblement des parallèles géographiques.

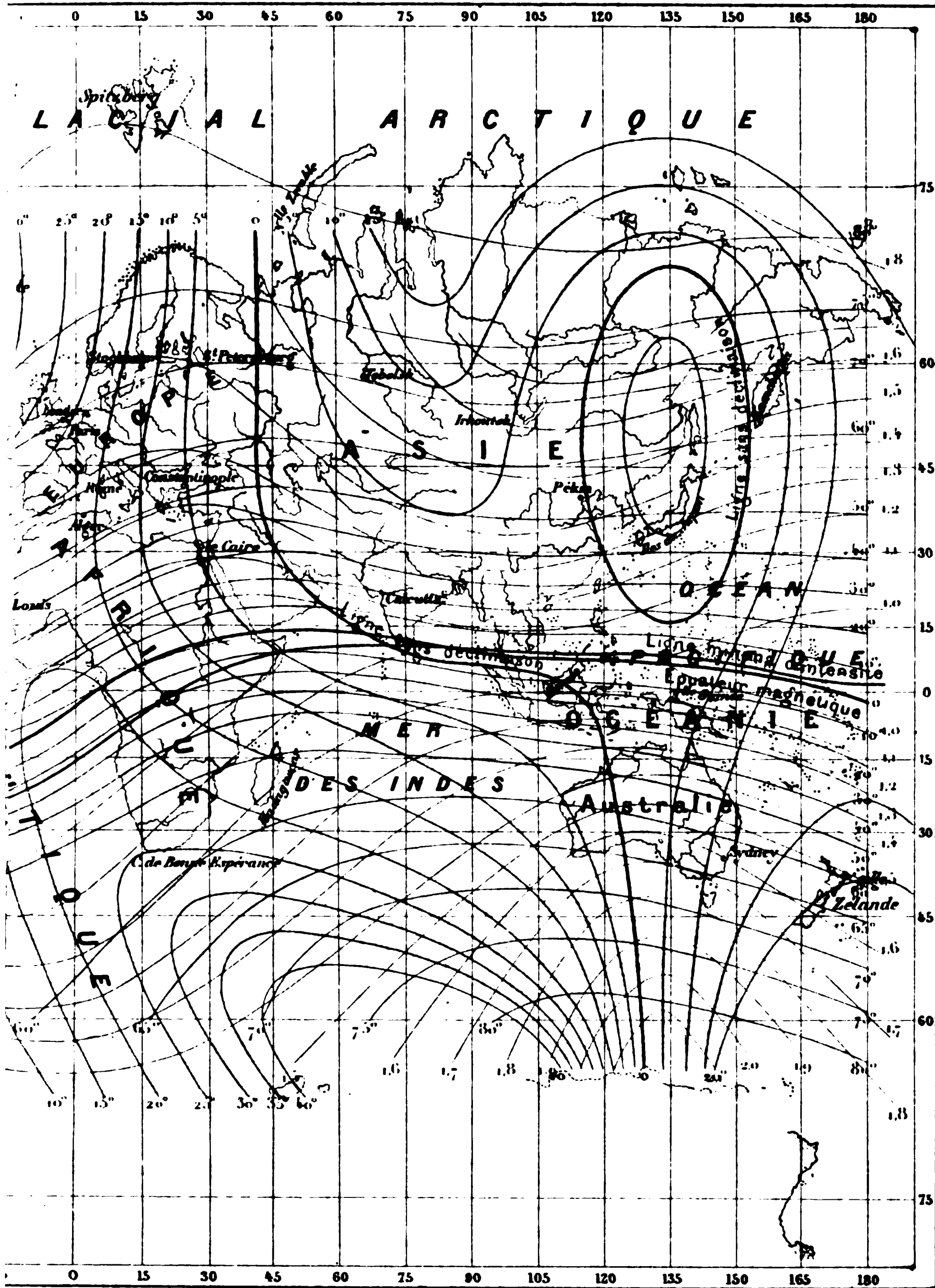
Ces systèmes de lignes ne sont pas permanents ; ce qui revient à dire que l'état magnétique de la Terre est soumis à certaines oscillations, les unes périodiques, les autres accidentelles. La déclinaison, l'inclinaison et l'intensité dynamique varient continuellement en un même lieu et dans la plupart des lieux de la surface du globe. Ces variations sont, les unes sécu-

Lignes isogones
Lignes isoclines
Lignes isodynamiques

Gravé chez Erhard

LE MAGNÉTISME

LIGNES ISOGONES, I



GLOBE TERRESTRE

INES ET ISODYNAMIQUES

laires, les autres annuelles, les autres diurnes. Par exemple, à Paris, la valeur de la déclinaison magnétique, qui est aujourd'hui égale à 18° environ, et est occidentale, était nulle en 1663, il y a un peu plus de deux siècles. Auparavant, elle était orientale : par exemple, en 1580, elle égalait 11° 30′ E. Depuis 1663, elle s'est écartée progressivement vers l'ouest jusqu'en 1814, où elle a atteint son maximum. Elle suit depuis une marche inverse. L'inclinaison a également varié depuis les observations les plus anciennes ; elle était de 75° à Paris en 1671, elle n'est plus aujourd'hui que de 66° : c'est une variation plus lente que celle de la déclinaison magnétique. Indépendamment de ces variations à longue période, le magnétisme terrestre en subit d'*annuelles* qui paraissent dépendre de la position du soleil relativement à l'équateur ; il est aussi sujet à des variations *diurnes* qui, en Europe par exemple, font marcher l'extrémité nord de l'aiguille aimantée vers l'ouest, à partir du lever du soleil jusque vers une heure ou deux heures après midi, pour la ramener en sens inverse reprendre sa position initiale vers dix heures du soir. L'amplitude de ces variations oscille entre 5 à 6 minutes et 20 à 25 minutes.

Les perturbations ou variations irrégulières du magnétisme terrestre consistent en des changements brusques qui se manifestent dans la position de l'aiguille des boussoles : les unes se rattachent très-évidemment à des phénomènes naturels, tels que les aurores polaires, les éruptions des volcans et les secousses des tremblements de terre ; les autres n'ont pas de causes connues.

Nous n'entrerons pas dans plus de détails sur ce sujet si intéressant, qu'on trouvera développé, soit dans les mémoires originaux, soit dans les ouvrages ayant pour objet la physique du globe. Il nous suffit d'en faire ressortir l'importance au point de vue des applications de la boussole décrites plus haut.

CHAPITRE II

LES PARATONNERRES

§ I — Principes qui servent de bases a la construction des Paratonnerres

Arago, dans sa belle *Notice sur le tonnerre*, passe en revue les divers procédés auxquels, depuis l'antiquité jusqu'à Franklin et même jusqu'à nous, le préjugé populaire ou le préjugé des hommes de science attribue la propriété de dissiper les orages ou de préserver de la foudre. Un grand nombre de ces procédés ne sont que des pratiques ayant pour origine une croyance superstitieuse et ne méritent pas d'être mentionnés. Quelques-uns sont fondés sur des hypothèses que l'expérience n'a pas justifiées, ou au sujet desquelles l'observation a fourni jusqu'à présent des résultats contradictoires.

Par exemple, on a pensé que de grands feux allumés en plein air enlevaient aux nuées, au moins en partie, leurs propriétés fulminantes. C'était l'opinion de Volta, basée sans doute sur ce fait d'expérience, que les flammes, les gaz chauds sont de bons conducteurs de l'électricité. Mais, dans le cas de feux allumés en plein air, les colonnes gazeuses s'élèvent-elles à une hauteur suffisante pour atteindre les nuages orageux? On a cité,

en tout cas, des localités où les paysans avaient l'habitude d'allumer, à l'approche des orages, des monceaux de paille, distribués çà et là dans les champs, et ces localités n'avaient pas été, en effet, maltraitées par la foudre ou par la grêle. Mais, d'autre part, des incendies considérables ont eu lieu un peu avant ou pendant de grands orages, sans que les nuées même les plus rapprochées du lieu du sinistre aient paru le moins du monde dépouillées de leur électricité. L'efficacité de ce moyen est donc au moins douteuse.

Un autre moyen de dissiper les nuées de toute espèce, et par conséquent les nuées orageuses, a été assez fréquemment employé par les marins ou par les agriculteurs. C'est celui qui consiste à produire des détonations d'artillerie, à tirer des coups de canon ou de boîtes à feu. Mais les exemples très-précis que cite Arago pour et contre cette méthode prouvent qu'elle est loin d'être d'une efficacité certaine. Il n'est même pas prouvé qu'elle ait eu jamais une influence quelconque sur la dispersion des nuages, et l'on pourrait tout aussi bien tirer des faits connus une conclusion opposée.

Il faut en dire autant du son des cloches. L'usage de mettre en branle les cloches des églises pendant les orages n'a pas d'autre origine que la superstition, et le plus sûr effet de cette pratique est de faire courir aux sonneurs un danger réel, pour écarter un danger beaucoup moindre à l'aide d'un secours imaginaire. La foudre, en effet, frappe de préférence les objets élevés, surtout ceux qui, comme les clochers, sont presque toujours surmontés de pièces métalliques isolées.

Depuis Franklin, qui est, comme on sait, l'inventeur des paratonnerres, la science ne peut donc recommander aucun autre moyen de préserver de la foudre les édifices, les maisons et leurs habitants, que cet appareil simple et presque toujours efficace, s'il est construit et établi d'après les conditions que l'expérience et la théorie s'accordent à regarder comme nécessaires.

Le paratonnerre est une application du pouvoir qu'ont les

pointes métalliques de décharger les corps électrisés placés dans leur voisinage, et l'idée d'utiliser cette propriété, que l'illustre physicien américain venait de découvrir, était une suite naturelle de son opinion sur l'identité de la foudre et du tonnerre avec les phénomènes électriques. Les expériences qui démontrèrent cette identité eurent lieu presque simultanément, en 1752, en Amérique et en France. Franklin lançait à cette époque, aux environs de Philadelphie, son fameux cerf-volant armé d'une pointe, et tirait des étincelles d'un nuage orageux. Le physicien français Dalibard faisait, à la même époque, la vérification des idées suggérées par Franklin, en établissant une barre de fer isolée, de 14 mètres de hauteur, dans la plaine de Marly-la-Ville.

Peu de temps après, les premiers paratonnerres étaient établis à Philadelphie. D'Amérique, ces appareils passèrent en Europe, et le premier qu'on ait vu en France fut posé à Dijon par Guyton de Morveau.

L'instruction la plus récente [1] sur l'emploi et la construction des paratonnerres est due à une commission de l'Académie des sciences, qui a fait son rapport le 14 janvier 1867, par l'organe de M. Pouillet. C'est ce rapport qui va nous fournir les éléments de notre description.

Commençons par exposer la théorie des nuages orageux et celle de l'action des paratonnerres sur l'électricité qu'ils contiennent.

« 1. Les nuages orageux qui portent la foudre ne sont autre chose que des nuages ordinaires chargés d'une grande quantité d'électricité.

» L'éclair qui sillonne le ciel est une immense étincelle électrique, dont les deux points de départ sont sur deux nuages éloignés et chargés d'électricités contraires.

1. Le premier rapport fait sur cette question intéressante date du 24 avril 1784, et la commission qui l'avait élaboré comptait dans son sein Coulomb, Laplace et Franklin lui-même.

En 1799, 1807, 1823 et 1855, des instructions nouvelles furent aussi communiquées et soumises à l'approbation de l'Académie des sciences.

» Le tonnerre est le bruit de l'étincelle.

» La foudre est l'étincelle elle-même ; c'est la recomposition des électricités contraires.

» Quand l'un des points de départ de l'éclair est à la surface du sol, on dit que le tonnerre tombe, ou plutôt que la foudre tombe, et que les objets terrestres sont foudroyés. Alors tous les points du sillon de l'éclair sont encore la recomposition ou la neutralisation des deux électricités contraires, dont l'une est fournie par le nuage et l'autre par la terre elle-même.

» Comment la terre, qui est en général à l'état naturel et sans électricité apparente, se trouve-t-elle ainsi chargée d'électricité, et d'une électricité contraire à celle du nuage au moment même où elle est foudroyée.

» Telle est la première question que nous avons à examiner.

» 2. Avant que la foudre éclate, le nuage orageux qui la porte, bien qu'il soit à plusieurs kilomètres de hauteur, agit par influence pour repousser au loin l'électricité de même nom et pour attirer l'électricité de nom contraire. Cette influence tend à s'exercer sur tous les corps ; mais elle n'est réellement efficace que sur les bons conducteurs : tels sont, à des degrés différents, les métaux, l'eau, le sol très-humide, les corps vivants, les végétaux, etc.

» Le même conducteur éprouve de la part du nuage des effets très-différents, suivant sa forme et ses dimensions, et surtout suivant sa parfaite ou imparfaite communication avec le sol.

» Un arbre, par exemple, quand il se trouve dans une terre médiocrement humide, ne reçoit qu'une très-faible influence, parce que l'électricité de même nom ne peut pas être repoussée au loin dans cette terre, qui n'est qu'un très-mauvais conducteur pour les grandes charges électriques.

» Si cet arbre, au contraire, se trouve dans une terre très-humide et d'une vaste étendue, il sera fortement influencé, parce que l'électricité de même nom peut s'étendre au loin dans ce bon conducteur. Enfin, il sera influencé autant qu'il

peut l'être, si ce bon conducteur, vers ses limites, est lui-même en bonne communication avec d'autres nappes d'eau indéfinies.

» Quand il s'agit de l'électricité de nos machines, la surface de la terre telle qu'elle se présente est ce qu'on appelle le *sol* ou le *réservoir commun*. On peut l'appeler ainsi, puisque la conductibilité est suffisante pour disperser ou neutraliser toutes ces petites charges électriques.

» Quand il s'agit de la foudre, la terre végétale, dans son état habituel, n'est plus ce que l'on peut appeler le réservoir commun; elle devient relativement un mauvais conducteur, ainsi que les formations géologiques de diverses natures sur lesquelles elle repose. Il faut arriver à la première nappe aquifère, c'est-à-dire à la nappe des puits qui ne tarissent jamais (nous l'appellerons ici la *nappe souterraine*), pour trouver une couche dont la conductibilité soit suffisante. Celle-ci, à raison de son étendue et de ses ramifications multipliées, ne peut pas être isolée des cours d'eau voisins, et avec eux, avec les fleuves et les rivières, avec la mer elle-même, elle constitue ce qu'on doit appeler le réservoir commun des nuages foudroyants, et, par conséquent, le réservoir commun des paratonnerres.

» En effet, pendant que le nuage orageux exerce partout au-dessous de lui son influence, attractive sur le fluide de nom contraire et répulsive sur le fluide de même nom, c'est surtout la nappe souterraine qui reçoit cette influence avec une incomparable efficacité. Alors toute sa surface supérieure se charge d'électricité contraire que le nuage y accumule par son attraction, tandis que l'électricité de même nom est repoussée et dispersée au loin dans le réservoir commun. Aussi, quand la foudre éclate, les deux points de départ de l'éclair sont, l'un sur le nuage et l'autre sur la nappe souterraine, qui est en quelque sorte le deuxième nuage nécessaire à l'explosion de la foudre.

» C'est ainsi que le globe de la terre, sans cesser d'être à l'état naturel dans son ensemble, se trouve éventuellement

électrisé sur quelques points par la présence des nuages orageux.

» Les édifices, les arbres, les corps vivants, frappés par la foudre, ne doivent être considérés que comme des intermédiaires qui se trouvent sur son chemin et qu'elle frappe en passant.

» Toutefois il ne faudrait pas en conclure que ces intermédiaires sont essentiellement passifs, et qu'ils ne contribuent jamais à modifier ou même à déterminer la direction du coup de foudre. Il est certain, au contraire, qu'ils exercent à cet égard une action d'autant plus grande, qu'ils ont une étendue plus considérable et une conductibilité meilleure. Par exemple, quand un vaisseau est foudroyé au milieu de la mer, il est très-probable que la foudre n'a pas pris le chemin qui aurait été géométriquement le plus court pour arriver à l'eau qu'elle cherche et où elle doit être neutralisée par le fluide contraire, mais qu'elle a choisi le chemin qui était électriquement le plus court, à raison des décompositions par influence que le nuage avait préalablement produites sur les mâts, les agrès et autres corps conducteurs du bâtiment, plus ou moins haut placés et plus ou moins conducteurs.

» Ce phénomène est analogue à celui que nous offre l'étincelle tirée à grande distance des conducteurs d'une puissante machine électrique : elle peut être détournée de son chemin le plus direct par la présence d'un ou de plusieurs conducteurs isolés que l'on dispose près de son trajet ; elle vient frapper le même but, mais elle y arrive par une voie électriquement plus courte, bien qu'elle soit plus longue en apparence.

» Ces conducteurs isolés changent ici la direction de l'étincelle. Les intermédiaires dont nous parlions tout à l'heure changent la direction de l'éclair.

» Nous nous bornons au simple énoncé de ce principe fondamental, que nous ne pouvons pas développer ici ; il contient l'explication de tous les mouvements, quelquefois si bizarres, des coups de foudre et de tous les effets destructeurs qu'ils produisent : on ne peut jamais s'en rendre compte sans en avoir

bien reconnu les deux points de départ, et, entre ces deux points, la série des intermédiaires qui ont été frappés par le sillon de l'éclair, tantôt simple, tantôt multiple. »

Là se termine la partie théorique du rapport, celle qui, dans la pensée des membres de la commission, sert de base aux indications pratiques formulées ensuite pour la construction et l'installation des paratonnerres. Résumons maintenant ces indications dans ce qu'elles ont d'essentiel.

§ II — Description et disposition des Paratonnerres

Un *paratonnerre* n'est autre chose qu'un bon conducteur, non interrompu, dont l'extrémité supérieure s'élève à une hauteur suffisante pour dominer l'édifice qu'il doit protéger, et dont l'extrémité inférieure communique largement avec la nappe d'eau souterraine.

Comme la foudre peut fondre ou volatiliser des fils métalliques d'un petit diamètre (jusqu'à 6 millimètres), mais qu'il est sans exemple qu'elle ait pu porter au rouge sombre des tiges de fer carrées de 15 millimètres de côté, on composera le conducteur des paratonnerres de barres de fer ayant cette dimension.

Le paratonnerre est formé de deux parties principales, la *tige* et le ou les *conducteurs*. Voici la description de chacune d'elles :

La tige de fer, qui forme l'extrémité supérieure, doit être terminée par un cylindre de cuivre rouge de 2 centimètres de diamètre et de 20 à 25 centimètres de longueur, s'ajustant à vis sur la tige. Ce cylindre est lui-même terminé en cône à son sommet. Au-dessous, la tige est carrée et augmente progressivement d'épaisseur jusqu'au point d'insertion avec le conducteur : là, sa section mesure environ 4 à 5 centimètres de côté. Enfin, selon les circonstances, la hauteur totale de la tige varie entre 3 et 5 mètres.

Autrefois, on recommandait de terminer la tige par une pointe fine et très–aiguë, d'or ou de platine. Il arrivait alors qu'aux premiers temps orageux, l'électricité s'écoulait par



Fig. 321. — Pointe conique de cuivre rouge du paratonnerre.



Fig. 322. — Tige verticale du paratonnerre.

la pointe, sous forme d'une aigrette lumineuse visible dans les ténèbres ; l'air vivement électrisé, en se transportant jusqu'au nuage, neutralisait, pensait–on, une portion du fluide de ce dernier. Mais aussi l'intensité du flux électrique était

assez vive pour déterminer la fusion de la pointe d'or ou de platine, de sorte qu'au bout de quelque temps la pointe aiguë disparaissait, remplacée par un large bouton de fusion du métal.

L'action préventive de la pointe aiguë provoquant l'écoulement de l'électricité sous forme d'aigrette lumineuse, n'était donc assurée que pour un temps limité ; mais c'était là d'ailleurs un faible avantage, s'il est vrai que l'air électrisé par la tige, au lieu d'être transporté jusqu'au nuage, était plutôt emporté latéralement par le vent. Telle est la raison qui fait aujourd'hui donner la préférence aux tiges terminées par un cylindre et un cône de cuivre.


Fig. 323. — Soudure de la tige verticale et du conducteur.

Ainsi formée, la pointe du paratonnerre donnera plus rarement le spectacle des aigrettes lumineuses; mais, à raison de sa forme et de la grande conductibilité du cuivre, elle résistera beaucoup mieux à la fusion, sans être moins efficace au point de vue de la protection de l'édifice. L'essentiel est que le courant électrique, qui passe du nuage au paratonnerre quand la foudre éclate, trouve un chemin ininterrompu depuis la tige jusqu'à la nappe d'eau souterraine.

La barre métallique servant de conducteur et ayant, comme on l'a vu, une section d'environ 15 millimètres de diamètre, doit être soudée avec soin à la tige (fig. 323), qui elle-même est solidement fixée à la charpente du faîte de l'édifice. Toutes ses parties successives horizontales, verticales ou inclinées seront reliées par des courbes et soudées avec le même soin aux points de jonction. La fixité en sera maintenue par des supports de fer à fourchettes, qui permettent le glissement longitudinal de la barre sans aucun ballottement latéral.

On remplace quelquefois les barres rigides qui forment le conducteur par des câbles composés de trois ou quatre torons

de fils de fer goudronnés pour éviter la rouille. Il faut alors veiller à ce que la communication du câble avec la tige ait lieu par le contact le plus large possible des surfaces métalliques de la tige et des fils ; ceux-ci doivent être parfaitement décapés et soudés au fer de la tige.

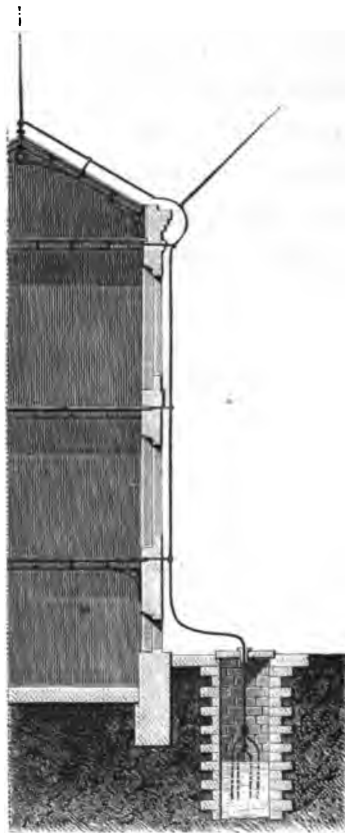


Fig. 324. — Installation d'un paratonnerre : tiges verticales et obliques.

De plus, condition essentielle, toutes les parties métalliques de l'édifice, les faîtages et chéneaux de plomb ou de zinc, les charpentes ou planchers de fonte ou de fer, devront être reliées ensemble et communiquer toutes avec le conducteur du paratonnerre.

Nous arrivons maintenant à la condition la plus essentielle, à celle qui, négligée, ferait du paratonnerre, au lieu d'un protecteur contre la foudre, un appareil dangereux en temps d'orage. Il faut que le conducteur, une fois arrivé au sol, y pénètre assez profondément pour être en communication constante avec la nappe souterraine. Pour cela, on devra creuser un puits spécial tel que, dans les plus grandes sécheresses, l'eau y conserve une hauteur d'au moins un mètre. Si des cours d'eau, fleuves ou rivières, assez importants pour ne point tarir dans les sécheresses, si des lacs ou de vastes étangs, se trouvent à proximité du conducteur, il pourra suffire de mettre celui-ci en communication constante avec la masse liquide.

Du reste, rien n'empêche de faire communiquer le conducteur avec la couche supérieure du sol, qui forme un réservoir supplémentaire, quand la pluie l'a suffisamment imbibée ;

mais cette précaution serait tout à fait insuffisante, si elle n'était combinée avec la condition principale d'un puits où le conducteur baigne par plusieurs branches, ainsi que le montre la figure 324. Quand une branche latérale est mise en contact avec le sol, on a soin de l'entourer d'une couche de braise, corps bon conducteur de l'électricité, et servant, en outre, à préserver le fer de la rouille.

Des faits nombreux démontrent l'efficacité des paratonnerres : mais, pour que cette efficacité soit réelle, il importe que les appareils établis remplissent toutes les conditions ci-dessus

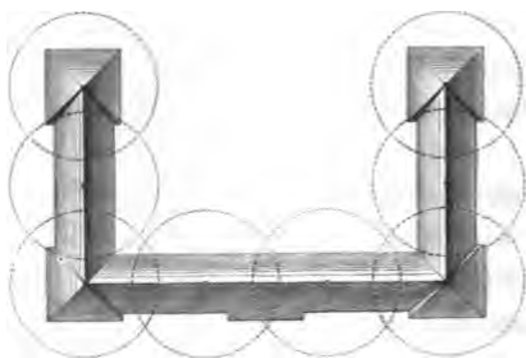


FIG. 325. — Limites de protection d'un système de paratonnerres installés sur un édifice.

énumérées. Il faut aussi que le nombre des paratonnerres et la hauteur des tiges soient en rapport avec les dimensions des édifices qu'ils doivent protéger. L'expérience a montré que plus est grande la hauteur de la tige verticale au-dessus du faîte de l'édifice, c'est-à-dire au-dessus du point d'insertion de cette tige avec le conducteur, plus la sphère d'action protectrice est considérable. D'ailleurs le rayon de cette sphère est environ égale au double de la hauteur de la tige.

Ces données suffisent pour déterminer le nombre des paratonnerres qu'il faut faire construire sur une maison, un bâtiment quelconque. On peut, avec Arago, donner cette règle générale : « Moins les tiges auront de hauteur, plus elles devront être multipliées. Leur nombre sera suffisant, lorsqu'il

n'y aura sur un comble, sur une terrasse, etc., aucun point dont la distance horizontale à la tige la plus voisine soit plus grande que le double de la hauteur de cette tige au-dessus de sa base. »

Des paratonnerres verticaux peuvent suffire, quand l'édifice est peu élevé. Dans le cas contraire, les parties latérales ont besoin d'être protégées spécialement, car on a des exemples de bâtiments foudroyés en des points beaucoup moins élevés que leurs sommets. Des tiges placées soit obliquement, soit même horizontalement, auront pour effet de décharger les lambeaux de nuages qui, dans les temps orageux, descendent souvent à peu de distance du sol, et contre lesquels les pointes verticales des paratonnerres n'ont pas d'action neutralisante. Il est bien entendu que ces tiges obliques doivent avoir leurs conducteurs comme les verticales. D'ailleurs, il sera avantageux de mettre toutes les tiges des paratonnerres d'un même édifice en communication par des barres métalliques courant le long des faîtages; mais, autant que possible, chacune aura néanmoins son conducteur séparé : plusieurs conducteurs peuvent, sans inconvénient, se rendre au même puits; mais si l'on réunit plusieurs barres en une seule, il faudra donner à celle-ci une section en proportion avec le nombre des conducteurs qu'elle remplace.

On a préconisé, dans ces dernières années, les paratonnerres à pointes multiples (fig. 326) comme meilleurs préservatifs contre les décharges latérales de la foudre.

Parmi les édifices qu'il importe le plus de préserver de la foudre, sont les magasins qui contiennent des matières explosives ou fulminantes, les capsuleries, les poudrières, etc. Mais alors, au lieu de surmonter directement les bâtiments de paratonnerres, on préfère entourer l'enceinte de mâts de charpente ou de maçonnerie, à l'extrémité desquels on établit les tiges. La raison de cette disposition et de cette précaution est aisée à comprendre : il ne suffit pas ici d'empêcher les édifices d'être foudroyés : il faut encore éviter le contact du flux électrique

qui s'écoule par les tiges et les conducteurs, avec les masses d'air voisines des magasins où l'on fabrique ou bien où l'on dépose les matières dangereuses. Dans cet air, flotte une fine

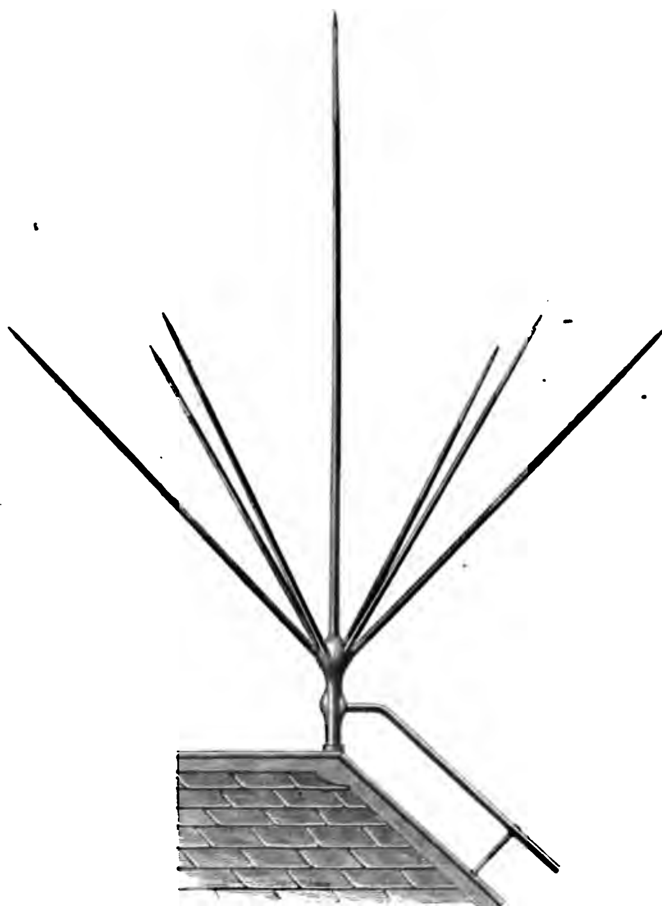


FIG. 326. — Paratonnerre à pointes multiples.

poussière de molécules inflammables, dont il faut éloigner le plus possible le courant de l'électricité orageuse.

Les navires en mer, par la forme et la hauteur de leur mâture, sont fort exposés aux coups de la foudre. Aussi est-il très-important de les munir d'un ou de plusieurs paratonnerres, dont les tiges verticales sont fixées au sommet des mâts. Les

conducteurs peuvent être, soit des barres, soit des câbles métalliques, qui vont rejoindre les hauteurs, et de là l'armure de cuivre de la carène. La communication avec la masse immense de la mer, toujours assurée, rend la protection de ces appareils toujours efficace.

Un Anglais, M. Harris, a imaginé, pour les paratonnerres des navires, un système de conducteurs qui est adopté par la marine militaire anglaise, et qui offre sur les câbles ou barres métalliques l'avantage de se prêter à tous les mouvements, à toutes les positions variables de la mâture. Ce système consiste en larges feuilles de cuivre qui enveloppent le mât et communiquent au doublage du navire. Il en résulte que dans les gros temps, quand les mâts sont brisés par la violence du vent, la foudre trouve toujours un système de conducteurs suffisants pour la décharge du coup et la rendant inoffensive. Arago rapporte que la frégate anglaise *Dryad* se trouva plusieurs fois exposée, sur la côte d'Afrique, aux violents orages que les navigateurs appellent *tornados* (le navire était muni des nouveaux paratonnerres de M. Harris). La matière fulminante descendait alors le long de ces tuyaux de cuivre continus en telle quantité, qu'elle donnait naissance à une sorte d'atmosphère lumineuse et à un bruit semblable à celui de l'eau qui bout très-fortement. Le navire fut ainsi toujours préservé.

CHAPITRE III

LA TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE

---

§ I — Invention de la télégraphie électrique

La *télégraphie*, ou l'art de communiquer à distance, de manière à transmettre des ordres, des nouvelles, des instructions d'une façon détaillée et précise, est une invention toute moderne, un art pour ainsi dire contemporain. Nous avons dit, dans le chapitre consacré à la téléphonie, quels étaient les moyens élémentaires de communication dont tous les peuples ont usé, de temps immémorial, pour correspondre rapidement à des distances considérables : les signaux de feu, les porte-voix, la voix humaine transmise de vedette en vedette, les coups de canon, les signaux maritimes consistant en combinaisons d'objets visibles, tous ces procédés reposaient sur la propagation rapide, sinon instantanée, de deux agents physiques, l'un néanmoins beaucoup plus lent que l'autre, le son, la lumière.

Mais ce n'est qu'à la fin du dernier siècle que l'on songea à perfectionner la télégraphie, de façon à la faire servir à la transmission des dépêches gouvernementales, à assurer le

secret de ces dépêches, tout en leur donnant le même degré de précision que le langage lui-même. Les télégraphes aériens de Chappe furent adoptés en 1793 par la Convention nationale, et peu après se répandirent dans tous les pays civilisés. Mais, avant même qu'ils fussent conçus, des essais se faisaient dans une voie toute différente : une science nouvelle, l'électricité, était venue révéler l'existence d'un agent qui se propageait avec une vitesse comparable à celle de la lumière, et la pensée d'utiliser les phénomènes de cet ordre pour les communications rapides se fit jour de tous côtés. Cinquante années étaient à peine écoulées, que le télégraphe électrique était inventé et détrônait le télégraphe aérien.

Aujourd'hui, les fils métalliques qui servent à transmettre la pensée humaine avec la vitesse de la foudre, pour les besoins du commerce, de la politique, de la science, aussi bien que pour les correspondances privées, sillonnent le globe tout entier. Ils forment un réseau d'une prodigieuse longueur qui ne couvre pas seulement les continents, mais qui traverse les océans et les mers et unit toutes les nations du monde, d'Europe aux Indes, en Afrique, en Australie, en Amérique. Du continent américain, cette merveilleuse chaîne va bientôt, traversant toute l'étendue du Pacifique, rejoindre le Japon et la Chine, et compléter ainsi l'enlacement du sphéroïde terrestre. Nous donnerons plus loin la statistique de la télégraphie électrique universelle. Achevons d'esquisser l'histoire de cette invention merveilleuse.

Pour donner cette histoire dans tous ses détails, c'est un chapitre, disons mieux, c'est un volume entier qu'il nous faudrait. Il nous suffira d'en marquer rapidement les principales phases, et de montrer comment ces phases se relient aux progrès mêmes de la science.

Avant l'invention de la pile, les projets de communication électrique, bien qu'assez nombreux, ne produisirent aucune application sérieuse pratique. Dans le système de Lesage (1774), l'électricité d'une machine se transmettait, par des fils métalliques

isolés, à des électroscopes dont les mouvements marquaient les lettres de l'alphabet : il y avait donc vingt-quatre fils, autant que de lettres. Plus tard, en 1798, Béthencourt substitua les décharges d'une bouteille de Leyde à celles d'une machine ordinaire, et le système fut appliqué entre Aranjuez et Madrid, sur une distance qui n'est pas moindre de 44 kilomètres. C'est un système analogue qu'avait construit, dès 1787, le physicien français Lomond. Reiser en 1794, Cavallo en 1795, Salva en 1796, et enfin Ronald en 1823, utilisèrent également l'électricité statique pour la transmission de signaux, en modifiant le mode d'indication, par exemple en employant les étincelles qu'on fait jaillir sur des carreaux étincelants.

La découverte de la pile dirigea les inventeurs dans une voie plus intéressante et plus voisine de la solution vraie. L'Américain Coxe en 1800, Sœmmerring en 1811, et enfin Schweigger, l'inventeur du multiplicateur, en 1828, eurent successivement l'idée d'utiliser les propriétés chimiques du courant voltaïque. Les bulles d'oxygène et d'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau indiquaient, en se dégageant à l'une des stations, divers signaux convenus qu'on produisait à l'autre station, c'est-à-dire à l'extrémité opposée des fils conducteurs, par des interruptions successives du courant.

Un nouveau progrès de la science, la découverte de l'action des courants sur l'aiguille aimantée (Œrsted, 1820), fut le point de départ de nouvelles recherches qui, enfin, conduisirent au but. L'année même de cette découverte capitale, Ampère définissait ce but, et indiquait en ces termes les moyens de l'atteindre :

« On pourrait, dit cet illustre physicien et philosophe, au moyen d'autant de fils conducteurs, et d'aiguilles aimantées qu'il y a de lettres, établir à l'aide d'une pile placée loin de ces aiguilles, et qu'on ferait communiquer alternativement par ses deux extrémités à celles de chaque conducteur, former une sorte de *télégraphe* propre à écrire tous les détails qu'on voudrait transmettre, à travers quelques obstacles que ce soit,

à la personne chargée d'observer les lettres placées sur les aiguilles. En établissant sur la pile un clavier dont les touches porteraient les mêmes lettres, et établiraient la communication par leur abaissement, ce moyen de correspondance pourrait avoir lieu avec facilité, et n'exigerait que le temps nécessaire pour toucher d'un côté et lire de l'autre chaque lettre. »

L'idée d'Ampère ne fut pas réalisée telle qu'il l'avait formulée ; le nombre des galvanomètres, dont chacun devait correspondre à une lettre de l'alphabet ou à tout autre signe à transmettre, eût été trop considérable; mais on verra bientôt, quand nous décrirons le télégraphe électro-magnétique à aiguilles, que c'est le même principe qui a présidé à sa construction. C'est à un savant anglais, Wheatstone, qu'on doit les perfectionnements et les simplifications qui ont donné à la conception d'Ampère toute son importance pratique.

Mais, avant d'en arriver à une réalisation complète, cette conception fut appliquée de diverses manières : par Schilling en 1833, par Gauss et Weber en 1835, par Richtie et Alexander en 1837. Le premier de ces savants appliqua son système à Saint-Pétersbourg, mais sur une petite échelle. « Cinq fils de platine renfermés dans un câble de soie aboutissaient, chacun par l'une des extrémités, à un multiplicateur, et, par l'autre, à un clavier semblable à celui d'un piano. On lançait le courant d'une pile dans l'un quelconque des fils, en abaissant la touche qui lui correspondait, et, suivant le sens du courant, l'aiguille était déviée d'un côté ou de l'autre : ce qui formait, avec les cinq aiguilles, dix signes différents. MM. Richtie et Alexander construisirent en 1837, à Édimbourg, un appareil dans le même système. Il y avait trente aiguilles correspondantes à autant de fils tendus entre les deux stations et à un égal nombre de signes. MM. Gauss et Weber employèrent aussi ce genre d'appareil pour faire communiquer le cabinet de physique et l'observatoire de Gœttingue. » (Daguin.)

L'époque arrive (1837 et 1838) où la télégraphie électrique va passer de la période des tâtonnements et des essais dans celle

de la réalisation vraiment pratique, et les noms des Wheatstone, des Steinheil, des Morse, des Masson, des Bréguet, rappellent les importants travaux, découvertes et perfectionnements qui caractérisent les divers systèmes successivement adoptés. Nous allons donc laisser là les aperçus historiques pour entrer dans la description de ces systèmes; mais nous devons, en terminant, rappeler encore, par un exemple, à quel point les applications de la science sont liées aux progrès purement scientifiques. Sans la découverte de piles nouvelles, sans la substitution des courants constants aux courants des premières piles, dont l'intensité décroissait si rapidement, il est probable que l'art merveilleux de la télégraphie électrique serait encore dans l'enfance. Ce serait une application curieuse de la physique, non une invention d'un usage et d'une utilité universels.

§ II — Le Télégraphe électrique — Théorie générale

Un morceau de fer doux en forme de fer à cheval, autour duquel s'enroule une hélice ou spirale faite d'un fil métallique isolé, constitue un *électro-aimant*, c'est-à-dire un aimant temporaire, un aimant dont la puissance magnétique subsiste pendant la durée du passage d'un courant électrique, et cesse dès que ce courant est interrompu.

Cette aimantation temporaire est instantanée; elle cesse avec la même rapidité qu'elle a pris naissance. Il en résulte que si, par un moyen quelconque, on parvient à faire passer un flux d'électricité dans l'hélice de l'électro-aimant, puis à l'anéantir dans une série rapide d'opérations composées de cette double opération élémentaire, l'attraction des pôles de l'aimant pour son armature se reproduira et cessera le même nombre de fois. Cette propriété est utilisée pour obtenir une suite de mouvements alternatifs de l'armature; il suffit, pour cela, d'armer celle-ci d'un ressort qui la maintienne à une faible distance

des pôles, sans l'empêcher d'arriver au contact toutes les fois que passe le courant.

Sur ce principe, on a basé la construction de machines qui ont reçu le nom de *machines électro-motrices*, parce qu'en effet l'électricité est la source du mouvement qu'elles produisent. Ce mouvement, qu'on a cherché à utiliser au point de vue purement mécanique, ainsi que nous le verrons dans un chapitre ultérieur, sert à la production de signaux qu'on peut transmettre avec une très-grande rapidité à des distances considérables, grâce à la vitesse énorme avec laquelle se propage

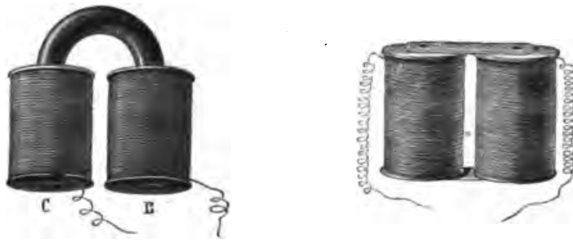


FIG. 327. — Électro-aimants.

l'électricité dans un fil conducteur. Tel est, réduit à sa plus grande simplicité, le mode de mouvement le plus généralement adopté dans les divers systèmes qui composent la télégraphie électrique.

Cependant, dans certains de ces systèmes, le courant électrique agit soit directement sur les aiguilles d'un galvanomètre, soit indirectement par ses propriétés chimiques ou électrolytiques. Mais, quel que soit d'ailleurs le mode d'action de l'électricité, un télégraphe électrique se compose toujours nécessairement des quatre parties suivantes :

Premièrement, d'un appareil producteur du courant, c'est-à-dire d'un *électro-moteur* : c'est tantôt une pile voltaïque, tantôt une machine d'induction magnéto-électrique ou électro-magnétique.

Deuxièmement, d'un appareil de transmission, formant un circuit ou *conducteur* électro-dynamique : c'est le fil ou les fils

de ligne reliant les stations de départ et d'arrivée des signaux.

En troisième lieu, d'un appareil producteur de signaux, qu'on nomme le *manipulateur :* c'est celui que manie la personne qui expédie la dépêche.

Enfin, en dernier lieu, d'un appareil récepteur où les signaux expédiés se reproduisent à la station d'arrivée : c'est ce qu'on nomme le *récepteur*.

Nous verrons bientôt qu'il y a dans un télégraphe électrique d'autres appareils secondaires, tels que les sonneries ou avertisseurs, les relais, les paratonnerres : nous les décrirons en leur lieu.

Tels sont les principes de la télégraphie électrique, telle qu'elle a été jusqu'à présent pratiquée. Le nombre des systèmes qui ont été et qui sont encore en usage dans le réseau universel est assez grand. Nous ne pouvons nous proposer de décrire que les plus usités, et parmi ceux-ci les systèmes les plus originaux, c'est-à-dire ceux qui se distinguent par une idée caractéristique, par un mécanisme spécial ou un mode particulier de signaux. A ce dernier point de vue, on peut classer les divers télégraphes électriques connus en cinq groupes :

1° Les *télégraphes à aiguilles*. Ce sont ceux dont les récepteurs sont composés d'aiguilles aimantées soumises à l'action immédiate du courant qui circule dans le fil de ligne : il en résulte des déviations à droite ou à gauche qui sont les éléments mêmes des signaux.

2° Les *télégraphes à cadran*, dont le récepteur consiste en un cadran muni d'une aiguille indicatrice dont la marche est réglée par un électro-aimant, soumis lui-même à l'action du courant alternativement lancé dans le fil et interrompu.

3° Les *télégraphes écrivants*, où la dépêche expédiée se trouve tracée dans le récepteur, sur une bande de papier qui se déroule d'une manière continue ; les traits gaufrés ou marqués à l'encre sont produits par un style dont le mouvement est dû au passage et à l'interruption du courant.

4° Les *télégraphes imprimeurs*, où la dépêche est elle-même

imprimée en caractères typographiques et ne nécessite dès lors aucune traduction.

5° Enfin les *télégraphes autographiques*, qui reproduisent non-seulement le texte, mais le *fac-simile* même de l'écriture de la dépêche ; de sorte que des signatures, des dessins peuvent être expédiés et reproduits avec leur forme originale. Ces appareils ont reçu, pour ce motif, le nom de *pantélégraphes* (du grec πᾶν, qui signifie *tout*).

Abordons maintenant dans les détails de leur mécanisme les principaux systèmes de télégraphie dont on vient de lire l'énumération.

§ III — Les Télégraphes électriques a aiguilles

Commençons par les *télégraphes à aiguilles*, qui, nous l'avons vu plus haut, sont ceux qui ont reçu les premiers la sanction d'une expérience sérieuse et pratique.

C'est à M. Wheatstone qu'en est due l'invention.

A l'origine, cet illustre électricien anglais employait cinq galvanomètres, ce qui exigeait, en y comptant le fil de retour, six fils de ligne. Voici comment étaient disposées les cinq aiguilles. Elles se trouvaient rangées au devant et sur la ligne centrale d'un losange, et les galvanomètres correspondants étaient placés derrière le cadre ainsi que les bouts des fils de chacun d'eux. Quand, à l'aide du manipulateur, on faisait passer le courant à travers deux des cinq galvanomètres dans un sens différent, les deux aiguilles déviaient à la fois, se plaçaient en diagonale et pointaient vers une des lettres inscrites sur le cadre. Par exemple, les aiguilles 1 et 4 (fig. 328), dirigeant leurs pointes supérieures vers le haut du cadre, indiquent la lettre B ; le courant passant dans ces deux galvanomètres en sens opposé, les aiguilles dirigent leurs pointes inférieures vers le bas du cadre, et marquent la lettre V. Quand une aiguille seule marche, elle

indique l'un des dix chiffres écrits sur les bords inférieurs du cadre.

Deux cadrans semblables reliés par les cinq fils de la ligne donnaient à la fois les mêmes indications, quand l'expéditeur de la dépêche manœuvrait le manipulateur. Dans l'inactivité, tous les circuits se trouvaient fermés les uns par les autres. En appuyant sur deux des boutons marqués des chiffres 7, 8, 9, 10,

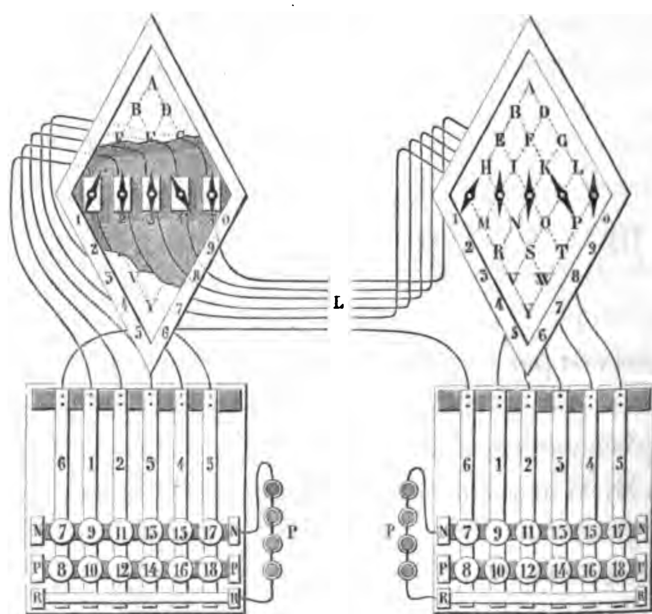


Fig. 328. — Télégraphe à cinq aiguilles de Wheatstone.

11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18, placés en deux rangées horizontales différentes, le courant passait à travers les deux galvanomètres correspondants, après avoir suivi à la fois les fils de la ligne et mis en action les mêmes aiguilles du cadran récepteur.

Nous ne décrirons pas le mécanisme du manipulateur de ce système, qui fonctionna cependant avec succès sur le chemin de fer de Londres à Birmingham, mais qui fut remplacé par un système plus simple. En effet, M. Wheatstone, associé avec M. Cooke, le modifia bientôt en réduisant le nombre des galva-

nomètres à deux et même à un. Il en résulta les télégraphes à une aiguille et à deux aiguilles, qui furent adoptés sur les lignes télégraphiques anglaises et que nous allons décrire. Le mécanisme en est, ainsi qu'on va le voir, d'une grande simplicité.

La figure 329 représente, à gauche, la face antérieure de l'appareil, qui est identique aux deux stations de départ et d'arrivée.

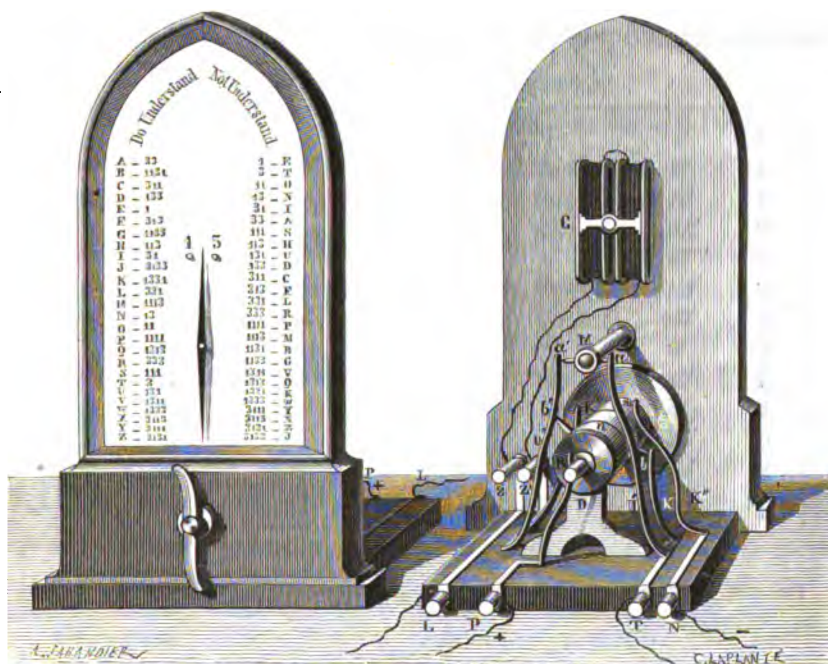


FIG. 329. — Télégraphe à une aiguille de Cooke et Wheatstone : manipulateur et récepteur.

Au centre, on voit l'aiguille extérieure du galvanomètre dont les déviations à gauche et à droite sont marquées par les chiffres 1 et 3, et sont limitées de chaque côté par un bouton d'ivoire. A la partie inférieure, est la poignée du manipulateur que l'expéditeur tourne à gauche ou à droite, selon le sens de la déviation qu'il veut produire. En combinant l'ordre et le nombre des déviations de l'aiguille à droite et à gauche, il suffit de 1, 2, 3 ou 4 mouvements pour représenter les lettres de l'alphabet, les chiffres de la numération et les signaux de convention.

Voici quels étaient ces signes conventionnels en Angleterre :

A	33	H	113	O	11	V	1311
B	1131	I	31	P	1111	W	1333
C	311	J	3133	Q	1313	X	3113
D	133	K	1331	R	333	Y	3111
E	1	L	331	S	111	Z	3131
F	313	M	1113	T	3		
G	1133	N	13	U	131		

Les chiffres sont indiqués par le nombre et l'ordre des déviations à droite et à gauche de la pointe inférieure de l'aiguille. On

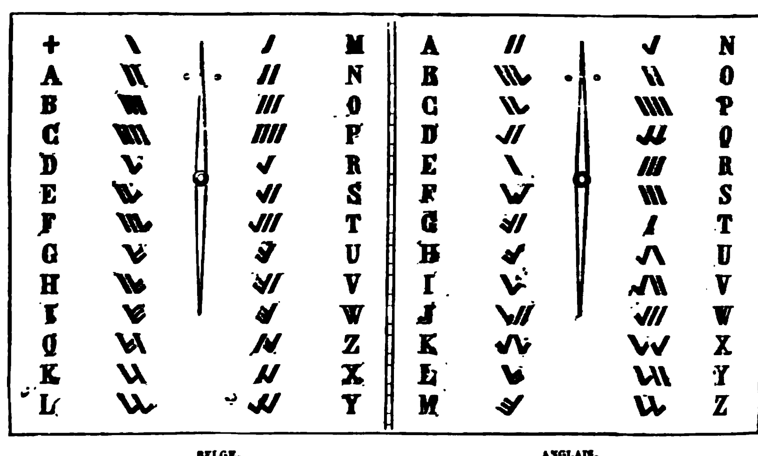


FIG. 330. — Vocabulaire belge et vocabulaire anglais du télégraphe à une aiguille.

passe des lettres aux chiffres et des chiffres aux lettres par un signal convenu. Disons une fois pour toutes que ces combinaisons de signes sont tout à fait arbitraires : ainsi les signaux adoptés en Belgique, pour ce système de télégraphes, étaient différents de ceux qu'on vient de voir. Mais le mécanisme n'est pas changé pour cela.

Voici quel est le manipulateur du télégraphe de Wheatstone, à une seule aiguille.

Comme on le voit sur la droite de la figure 329, qui montre l'appareil sur sa face postérieure, le galvanomètre G est placé au centre de la borne verticale qui est représentée sur sa face antérieure dans la même figure. L'aiguille indicatrice est montée

sur le même axe que l'aiguille aimantée du galvanomètre : elles sont d'ailleurs toutes deux aimantées, en formant un système compensé, comme dans le galvanomètre de Nobili (voyez les *Phénomènes de la physique*, liv. VI). Ce qui constitue, à vrai dire, le manipulateur ou commutateur, est situé au-dessous du galvanomètre. Il se compose d'un cylindre de buis porté sur deux tourillons métalliques, dans l'axe de la poignée extérieure, et pouvant tourner, comme elle, à droite ou à gauche. Extérieurement, ce cylindre est enveloppé de deux feuilles métalliques isolées l'une de l'autre, *m*, *n*. Le tourillon D est en contact constant avec le ressort R, et aussi avec la feuille *n*. Deux pointes métalliques *b* et *b'* partent de chacune des feuilles, et, selon leur position, viennent buter, la première contre le ressort K, la seconde contre le ressort U. La feuille *m* est en contact permanent avec le ressort K''. On voit en M une tige métallique munie latéralement de deux pointes qui, selon la position de la poignée, touchent en *a* et *a'*, soit le ressort U', soit le ressort U. Enfin les fils du galvanomètre aboutissent aux deux bornes Z et Z', reliées elles-mêmes, la première avec la borne L du fil de ligne, la seconde avec les ressorts U'K' et le fil du pôle positif de la pile ; d'autre part, les ressorts K et U sont reliés au fil de terre T, et K'' au fil négatif N de la pile.

Cela posé, imaginons la poignée du manipulateur verticale. En ce cas, les pointes *b*, *b'*, sont elles-mêmes verticales, et les parties métalliques du cylindre restent isolées : le courant de la pile ne peut passer de l'une à l'autre, ni par suite entrer dans les fils du galvanomètre.

Supposons la poignée tournée à droite : c'est le cas de la figure 329. Les deux pointes *b* et *b'* appuient contre les ressorts K et U', éloignant ce dernier du contact de la pièce M. Le courant suivra alors le chemin marqué par la série des lettres correspondantes aux diverses pièces du manipulateur, dans l'ordre que voici : PRD*nb'*Z'GZL ; le courant qui arrive ainsi dans le fil de ligne, après avoir fait dévier à droite la pointe supérieure de l'aiguille du galvanomètre expéditeur, poursuit sa route, entre

dans l'appareil récepteur et fait dévier dans le même sens l'aiguille de son galvanomètre, puis il se perd dans la terre. Comme nous le verrons plus loin, la terre joue le rôle de fil de retour, de sorte que le pôle négatif de la pile de l'appareil expéditeur achève le circuit par l'intermédiaire des pièces T K *b m* K″ N.

Quand, au contraire, la poignée est tournée à gauche, le sens du courant est renversé, par le fait des pointes *b* et *b′*, dont la

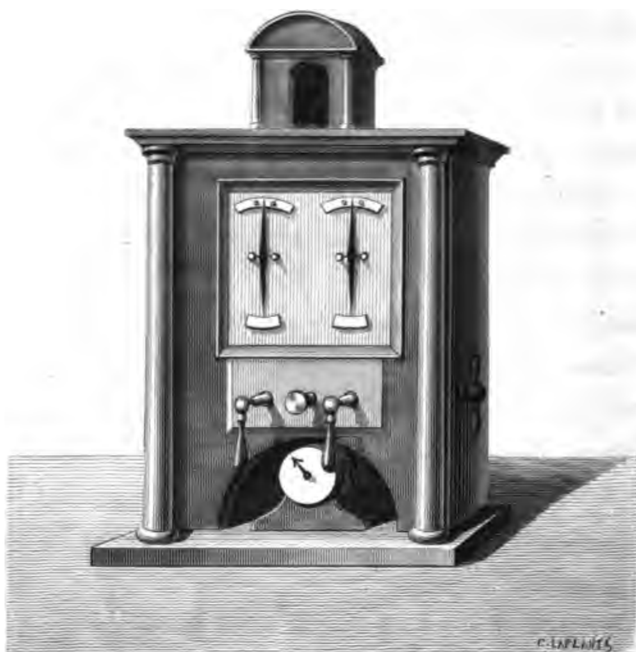


Fig. 331. — Télégraphe à deux aiguilles.

première appuie sur le ressort K′, la seconde sur le ressort U qu'elle éloigne en même temps de la pièce M. Le chemin suivi par le courant est alors indiqué par la série des lettres :

N K″ *m b* K′ Z′ G Z L, la ligne, puis T U *b′ n* R P.

Le courant a circulé en sens contraire, dévié à gauche l'aiguille du galvanomètre expéditeur en même temps que celle du récepteur.

On voit donc que le courant voltaïque, dans ce système, tra-

verse à la fois et dans le même sens les galvanomètres des deux postes télégraphiques extrêmes ; il est interrompu simultanément dans l'un et dans l'autre. Les signaux expédiés se trouvent donc reproduits au même instant.

Le *télégraphe à deux aiguilles* des mêmes inventeurs est basé sur le même principe que le précédent. Les deux appareils du poste expéditeur et du poste récepteur sont composés chacun d'un double galvanomètre et d'un double manipulateur, d'ailleurs indépendants l'un de l'autre. L'employé qui les manœuvre

Aiguille gauche		*Les deux aiguilles ensemble*			*Aiguille droite*	
+	\	R ou 8	\	\	\	H ou 4
A	\\	S	\\	\\	\\	I
B	\\\	T	\\\	\\\	\\\	K
C ou 1	⌵	U ou 9	⌵	⌵	⌵	L ou 5
D ou 2	✓	V ou 0	✓	✓	✓	M ou 6
E ou 3	/	W	/	/	/	N ou 7
F	//	X	//	//	//	O
G	///	Y	///	///	///	P
		Z	/	\		
		Q	\	/		

Fig. 332. — Vocabulaire du télégraphe à deux aiguilles.

prend, de chaque main, les deux poignées qui font mouvoir les manipulateurs de droite et de gauche; puis il les tourne dans un sens ou dans l'autre, séparément ou simultanément, de manière à reproduire les signaux qui constituent l'alphabet et les chiffres conventionnels dont la figure 332 donne le tableau.

Au sommet de l'appareil (fig. 331) est la sonnerie qui sert à annoncerl'envoi d'une dépêche. Sur le côté, sont deux bandes métalliques qui servent à mettre la sonnerie en communication avec le courant de la ligne. L'employé récepteur, une fois prévenu, répond par un signal convenu qu'il est prêt à recevoir, puis il tourne la poignée qu'on aperçoit sur le côté de l'appareil, de manière à supprimer la communication électrique avec la

sonnerie et à interrompre le carillon, pendant toute la durée de la réception.

Le cadran placé en bas des poignées des manipulateurs est muni d'une aiguille qui, suivant sa position sur le cadran, soustrait tel ou tel poste de la ligne à l'action du courant, ou divise la ligne en deux fragments indépendants. C'est ce qu'on nomme l'*appareil silencieux*. Grâce à ce commutateur, on peut restreindre la communication télégraphique aux stations directement intéressées, et le service peut continuer indépendamment entre toutes les autres.

Dans les télégraphes à deux aiguilles, comme dans le télégraphe à une aiguille, les déviations sont limitées par deux petites colonnettes d'ivoire, qui ont en outre l'avantage de faire saisir à l'oreille, par les petits coups secs de l'aiguille sur l'ivoire, le nombre des battements.

D'autres inventeurs ont construit divers systèmes de télégraphes à aiguilles qui ont fonctionné avec succès. Nous citerons quelques-uns d'entre eux, en indiquant seulement le principe de leur construction.

Mentionnons d'abord le télégraphe à deux aiguilles de M. Glœsener, qui n'est autre chose qu'une modification de celui de M. Wheatstone. Cette modification consiste principalement dans l'adjonction au multiplicateur du récepteur, de deux électro-aimants, dont chacun réagit sur un pôle différent des trois aiguilles aimantées composant le galvanomètre. L'hélice magnétisante de ces électro-aimants est la continuation du multiplicateur. D'après M. Glœsener, cette addition double la force de l'appareil de Wheatstone.

Le télégraphe à une aiguille de M. Bain repose sur un principe différent de ceux qu'on vient de décrire. L'organe électro-magnétique est un électro-aimant dont les bobines réagissent sur deux aimants permanents en forme de demi-cercles, mobiles autour d'un axe qui porte l'aiguille indicatrice. Les attractions et répulsions simultanées dans un sens ou dans l'autre, produites dans les pôles de l'électro-aimant et des aimants permanents

par le passage du courant voltaïque, font dévier l'aiguille à gauche ou la ramènent dans sa position verticale. Le manipulateur est un simple commutateur à renversement de pôles, qu'on manœuvre à l'aide d'une manivelle : des ressorts à boudin ramènent celle-ci dans la verticale. Le télégraphe Bain a fonctionné dès 1846 sur la ligne d'Édimbourg à Glasgow.

Le télégraphe à aiguilles d'Henley a pour organes moteurs une machine magnéto-électrique. Un électro-aimant peut tourner au devant des pôles d'un fort aimant permanent en forme

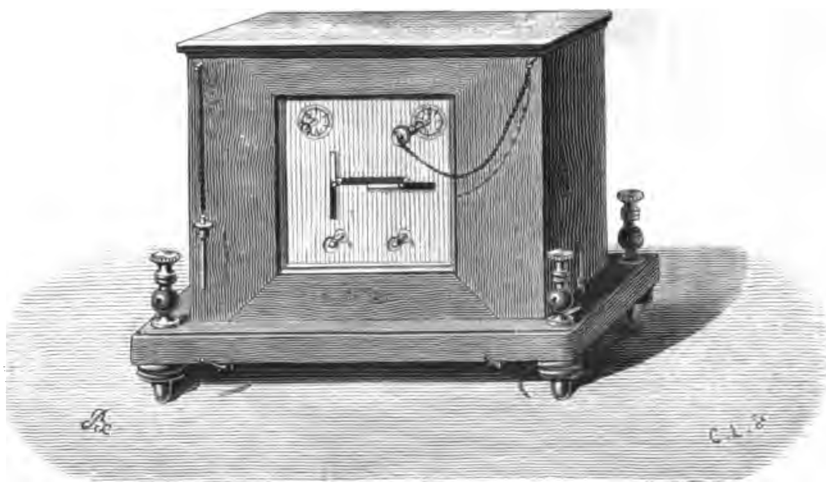


FIG. 333. — Récepteur du télégraphe à aiguilles, système Foy et Bréguet.

de faisceau en fer à cheval. A l'aide d'une pédale d'ivoire qu'on presse avec le doigt, on fait naître un courant d'induction qui circule dans la ligne et le récepteur, et, aussitôt le doigt levé, un second courant de sens contraire. Le récepteur est lui-même un électro-aimant muni de deux morceaux de fer doux à ses deux pôles : c'est entre ces morceaux en forme de fer à cheval qu'est placée l'aiguille aimantée dont les déviations sont répétées par une aiguille indicatrice parallèle montée sur le même axe. Les signaux du télégraphe d'Henley sont semblables à ceux du vocabulaire Morse qu'on trouvera plus loin.

Enfin, deux de nos compatriotes, MM. Foy et Bréguet, ont

imaginé un système de télégraphe à aiguilles ayant pour objet de reproduire les signaux du télégraphe aérien de Chappe. Ce système a fonctionné dès 1845 sur la ligne de Paris à Rouen (145 kilomètres), et a donné, paraît-il, d'excellents résultats. Comme le télégraphe à deux aiguilles de Wheatstone, il exigeait deux fils de ligne, mais les inventeurs ont construit des appareils à une seule aiguille, n'exigeant qu'un fil et donnant encore de 100 à 120 signaux par minute.



Fig. 334. — Manipulateur du télégraphe à aiguilles Foy et Bréguet.

La figure 333 représente le récepteur, qui est formé de deux appareils symétriques et indépendants, correspondant chacun avec une des aiguilles indicatrices. Ces aiguilles, moitié noires et moitié blanches, peuvent prendre chacune huit positions autour de leurs centres, deux horizontales, deux verticales et quatre à 45° de chacune des autres, ce qui donne un nombre total de 64 signaux disponibles. Le mécanisme du récepteur a beaucoup d'analogie avec celui du télégraphe à cadran Bréguet, que nous décrirons plus loin en détail. En tournant la poignée M du manipulateur, qui est double aussi (fig. 334), et lui

donnant l'une des huit positions correspondant aux huit crans d'une roue fixe, on fait mouvoir une autre roue montée sur l'axe de la manivelle et sur le plan de laquelle est tracée une gorge creuse et sinueuse. Le ressort B*c* prend alors, soit la position qu'on lui voit dans la figure, et alors la pièce *l* touche la pièce métallique *v*, soit une position plus rapprochée du centre; *l* va en ce cas toucher la pièce gauche *v'*. Les deux pièces *v* et *v'* sont isolées par un morceau d'ivoire de la partie métallique du manipulateur, auquel aboutissent les fils de la pile, de la ligne et du récepteur. Il y a donc tantôt passage, tantôt interruption du courant, ce qui produit dans le récepteur des mouvements correspondants de l'aiguille indicatrice.

A		N	
B		O	
C		P	
D		Q	
E		R	
F		S	
G		T	
H		U	
I		V	
J		W	
K		X	
L		Y	
M		Z	

Fig. 335. — Vocabulaire du télégraphe à aiguilles Foy et Bréguet.

Voici le vocabulaire alphabétique qui était adopté pour le télégraphe à aiguilles français. Le trait horizontal est commun à tous ces signaux et n'exige aucune opération. Sept lettres, A, B, C, E, F, G, W, ne demandent que l'action du manipulateur de gauche; six lettres, H, I, K, M, N, O, que celle du manipulateur de droite. Les treize autres signes exigent le mouvement simultané des deux manipulateurs et des deux appareils. Ce système a été employé longtemps par les administrations des lignes télégraphiques françaises.

§ IV — Les télégraphes électriques a cadran

Le *télégraphe électrique à cadran* est surtout employé dans le service des chemins de fer. La principale raison de cette

préférence consiste dans la facilité de manœuvre de cet appareil, qui, après un très-court apprentissage, permet à un employé quelconque des lignes de manipuler pour l'envoi d'une dépêche et de lire les signaux à leur réception.

C'est à Wheatstone qu'est due l'invention du premier télégraphe de ce genre : les premiers essais en furent faits en France, en juin 1844, sur le chemin de fer de Paris à Versailles. Depuis, un grand nombre de systèmes analogues ont été

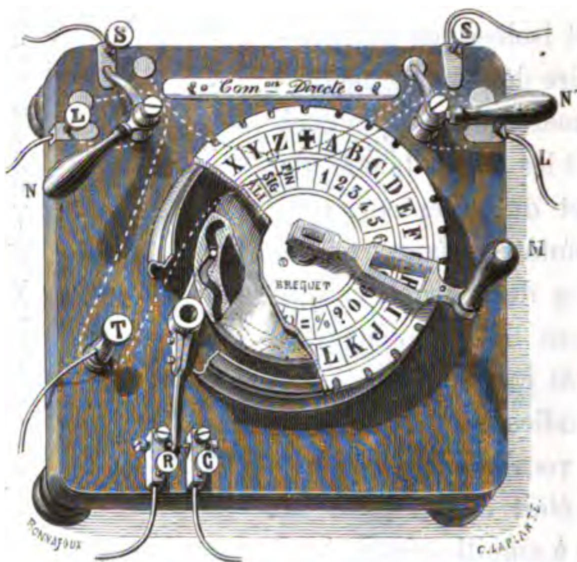


Fig. 336. — Manipulateur du télégraphe à cadran, système Bréguet, nouveau modèle.

expérimentés ou adoptés sur diverses lignes télégraphiques en différents pays. Nous en mentionnerons plus loin quelques-uns des plus remarquables, en indiquant sommairement en quoi diffèrent leurs principes ou leurs mécanismes. Bornons-nous, en ce moment, à décrire le système qui est, de tous les télégraphes à cadran, le plus répandu sur les chemins de fer de France : c'est celui de M. Bréguet, qui est dérivé du télégraphe à cadran de Wheatstone.

Les figures 336 et 337 représentent le manipulateur.

C'est un cadran de laiton porté par trois colonnes métalliques sur un socle horizontal de bois. Deux zones concentriques,

divisées chacune en vingt-six secteurs, reproduisent, l'une les vingt-cinq lettres de l'alphabet et une croix, l'autre les nombres successifs de 1 à 10, plus une suite de signes ou des signaux spéciaux. Ces signes étaient, dans l'ancien modèle, remplacés par les nombres de 10 à 25 (fig. 337). Sur un axe qui traverse le centre du cadran est articulée une manivelle M qu'on peut faire tourner dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, et arrêter sur l'une quelconque des lettres ou sur l'un des chiffres marqués : à cet effet, la manivelle porte une dent qui vient s'engager dans l'échancrure dont la circonférence du cadran est percée au milieu de chacun des vingt-six secteurs.



Fig. 337. — Manipulateur Bréguet, ancien modèle.

Le mouvement de la manivelle entraîne celui de son axe et d'une roue mobile dans laquelle est creusée une gorge sinueuse qu'on voit dans la partie du cadran que la figure suppose enlevée. Les sinuosités de cette gorge sont en même nombre que les secteurs, c'est-à-dire qu'elle comprend treize arcs convexes et treize arcs concaves correspondant tous aux lettres ou aux chiffres. Un levier coudé T articulé en *a* (fig. 337) porte une petite tige sur laquelle roule un galet d'acier trempé. Le mouvement de la roue se communique ainsi au galet qui entre dans la gorge sinueuse, de sorte que l'extrémité du levier, tantôt s'approche, tantôt s'éloigne du centre, exécutant ainsi autant d'oscillations que la manivelle parcourt de divisions successives sur le cadran.

Voyons maintenant comment ce mouvement imprimé à la manivelle du manipulateur permet de produire une série d'envois et d'interruptions du courant dans le fil de la ligne. Mais aupa-

ravant il faut décrire les diverses pièces du manipulateur et les communications qu'elles permettent d'établir entre les piles, les fils de ligne et les appareils eux-mêmes.

Le fil qui part du pôle positif de la pile arrive à la borne R, qui est reliée par une bande métallique à la vis P. En face de la pointe de cette vis, est celle d'une autre vis Q, laquelle communique de la même manière avec la borne R′, où aboutit le fil du récepteur. C'est entre les pointes de ces vis qu'oscille la branche du levier T, qui touche tantôt l'une, tantôt l'autre. Supposons le manipulateur au repos ou sa manivelle sur la croix : c'est la position indiquée par la figure 337. En ce cas, le courant ne passe pas, le circuit n'est pas fermé, et il en est de même toutes les fois que le levier a la même position, c'est-à-dire toutes les fois que la manivelle passe sur une division paire, sur les lettres B, D, F... ou les chiffres 2, 4, 6... Si, au contraire, la manivelle en mouvement passe devant une division impaire ou s'y arrête, le courant entre par le levier T dans la roue mobile du manipulateur. Il reste à faire voir comment il est lancé dans l'un ou l'autre des fils de ligne, à droite ou à gauche de la station. C'est en L et L′ qu'aboutissent ces fils. Les deux languettes métalliques L et L′ communiquent d'une façon permanente avec deux commutateurs à ressort *r*, *r′*, qu'on peut tourner à l'aide d'une poignée, et dont les ressorts se placent à volonté sur les languettes S*m*, S′*m′*, ou sur les extrémités de la bande métallique CD.

Veut-on correspondre avec le poste télégraphique de gauche, on place le ressort du commutateur *r* sur *m*; pour correspondre à droite, c'est le ressort *r′* qu'on appuie sur *m′*. Les deux pièces *m* et *m′* sont reliées métalliquement à la roue mobile du manipulateur. Donc, si le courant de la pile arrive dans celle-ci, elle passe par *m*, le ressort *r*, la borne L et le fil de gauche, par hypothèse. Le courant est lancé dans la ligne, arrive au récepteur du poste, de là dans le fil de terre de ce poste, et revient, par la terre même, au pôle négatif de la pile du poste expéditeur. Même résultat pour la ligne de droite, si c'est le

commutateur de droite dont on a placé le ressort sur la languette m'.

En résumé, si l'on imprime un mouvement de rotation à la manivelle du manipulateur, de manière à lui faire accomplir une rotation complète, il y aura eu *treize* passages du courant dans le fil de ligne et alternativement *treize* interruptions de ce même courant. Supposons qu'on veuille expédier le mot Paris, c'est-à-dire envoyer les cinq lettres P, A, R, I, S. Après un avertissement sur lequel nous reviendrons, l'expéditeur fait



Fig. 338. — Récepteur du télégraphe à cadran Bréguet : vue extérieure.

tourner la manivelle depuis la croix jusqu'à la lettre P, et il la fixe un instant dans l'échancrure correspondante, puis il achève le tour jusqu'au signe ✝. Il arrête de nouveau la manivelle sur A, revient de nouveau à la croix, puis passe aux lettres R, I, S, de la même manière.

A chaque fois ou à chaque tour, le nombre des envois et des interruptions du courant est de vingt-six, mais il y a un temps d'arrêt correspondant au moment où la manivelle s'arrête sur la lettre qu'on veut expédier. Ces envois et interruptions et ces arrêts sont reproduits dans le même ordre au poste récepteur, et il nous reste à faire voir comment ils se manifestent dans

l'appareil récepteur de ce poste, en faisant marcher sur le cadran de cet appareil une aiguille qui reproduit identiquement les mouvements de la manivelle.

Décrivons donc maintenant ce récepteur.

La figure 338 en représente la disposition extérieure. C'est une boîte munie d'un cadran ayant les mêmes divisions que le cadran du manipulateur. A l'intérieur est logé un mouvement

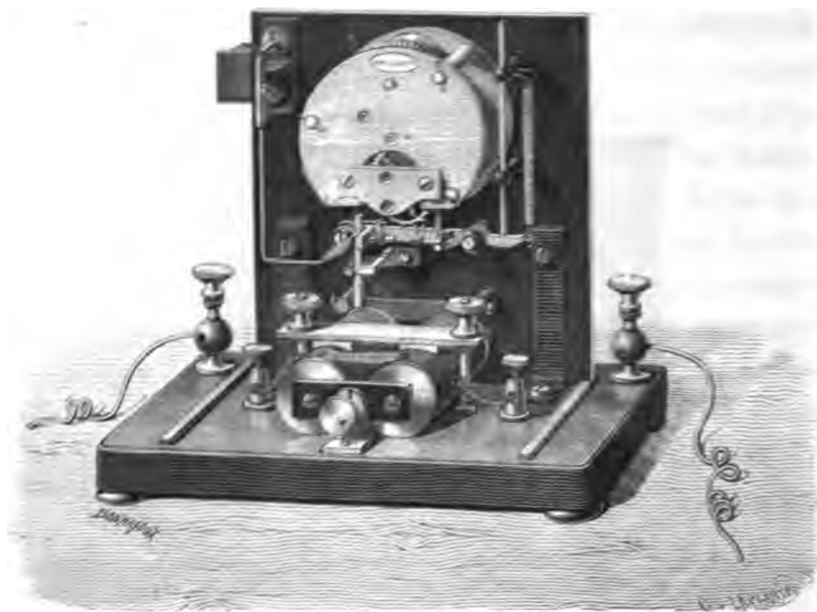


FIG. 339. — Récepteur Bréguet : vue du mécanisme.

d'horlogerie, dont la roue d'échappement et l'aiguille du cadran ont même axe ; de sorte que toutes les fois qu'une dent de cette roue échappe, l'aiguille marche d'une division. Le courant lancé sur la ligne par le manipulateur du poste expéditeur arrive à l'une des bornes qu'on voit sur la base du récepteur, suit le fil des bobines d'un électro-aimant placé à la partie interne et inférieure du récepteur, agit sur un mécanisme particulier que nous allons décrire, et va se perdre dans le sol par l'autre borne. Nous n'avons donc plus qu'à montrer quel est le mode d'action du courant et de l'électro-aimant sur la

roue d'échappement, pour achever de faire comprendre comment les signaux, lettres ou chiffres expédiés, se reproduisent sur le cadran au moyen de l'aiguille. C'est ce qui sera rendu facile par l'étude des figures 339 et 340, qui représentent le mécanisme spécial de l'appareil récepteur.

On voit à la base de cet appareil, reposant sur le socle, l'électro-aimant dans les spires duquel passe le courant lancé dans la ligne par le poste expéditeur. En face de ses pôles, se trouve une armature de fer doux M, portée par deux vis,

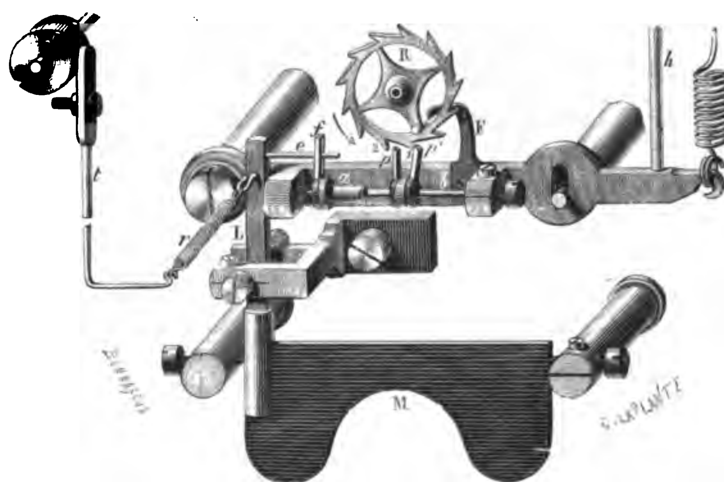


Fig. 340. — Détails du mécanisme dans le récepteur Bréguet.

entre lesquelles elle peut osciller autour de son arête horizontale supérieure. Quand le courant passe, elle est attirée par les pôles, alors actifs, de l'électro-aimant, et elle s'applique contre eux. Quand le courant est interrompu, elle s'éloigne des mêmes pôles par un mouvement opposé vers la face antérieure du récepteur où est fixé le cadran. C'est le mouvement de va-et-vient de l'armature M qui se communique par un mécanisme particulier à l'aiguille indicatrice.

Elle porte à cet effet une tige L verticale, qui oscille comme l'armature, mais en sens inverse (fig. 340). Cette tige, limitée dans ses mouvements par deux vis, porte à son extrémité une goupille *e* qui s'engage dans une fourchette *f*, de sorte que

celle-ci oscille tantôt en avant, tantôt en arrière, en communiquant ses propres oscillations à un arbre *ba*, et, par suite, aux palettes *pp'*, dont le rôle est, en définitive, de laisser échapper ou d'arrêter les dents de la roue d'échappement R.

Supposons le récepteur au repos, l'aiguille indicatrice étant sur la croix, la palette *p'* se trouve butée contre la dent 1 de la roue; le rouage est immobile. Qu'une émission de courant ait lieu, c'est-à-dire que l'aiguille du manipulateur s'avance de la croix sur la lettre A, le courant suit la ligne, entre dans le récepteur et dans l'électro-aimant qui attire au contact l'armature M. Le mouvement de celle-ci détermine la rotation en sens contraire de l'arbre *ab'*, de la palette *p'* qui laisse échapper la dent 1, et la dent *p* vient buter contre la dent 2, dès que le rouage mis en marche par le fait de l'échappement a fait tourner la roue. L'aiguille indicatrice s'est donc avancée d'une division et s'arrête sur A.

Dès que le courant cesse, l'armature revient à sa position première sous l'action du ressort *r*; la palette *p* laisse échapper la dent 2, le rouage marche de nouveau, et c'est la palette *p'* qui arrête à son tour la dent 2 : l'aiguille a marché d'une nouvelle division.

Une disposition très-simple permet de faire retourner l'aiguille à la croix sans émission de courant (ce qui est quelquefois nécessaire). A l'aide d'une tige *h* qu'on voit sur la droite, on abaisse l'arbre qui porte les palettes et les palettes elles-mêmes; celles-ci ne butant plus contre les dents de la roue d'échappement, le rouage se met en marche jusqu'à ce qu'une goupille F rencontre un arrêt convenablement placé, qui correspond à la position pour laquelle l'aiguille est sur la croix.

Le petit cadran qu'on voit (fig. 338) au côté gauche supérieur du récepteur, sert à régler le ressort *r*. Si ce ressort n'était pas convenablement tendu, l'amplitude des oscillations de l'armature pourrait être ou trop grande ou trop petite : dans le premier cas, les palettes sont exposées à sortir du plan de la roue d'échappement, et le rouage marche sans interruption ; dans le

second cas, les palettes ne peuvent pas se dégager des dents, et l'échappement n'a pas lieu : le récepteur ne fonctionne pas.

Il nous reste à montrer comment sont disposés les appareils d'un poste, et nous prendrons pour exemple un poste intermédiaire, pouvant correspondre sur la ligne avec deux postes voisins, situés l'un à droite, l'autre à gauche du premier.

Soit le poste de Sèvres, sur la ligne télégraphique de Versailles à Paris. La figure 341 représente les appareils manipulateur et récepteur. Le manipulateur est fixé sur une table, et l'on voit de chaque côté les boussoles-galvanomètres qui accusent les transmissions des courants sur chaque fil de ligne. Plus haut, sur une même tablette horizontale, se trouve rangé le récepteur, et de chaque côté la sonnerie qui avertit de l'envoi d'une dépêche, soit du côté de Paris, soit du côté de Versailles. Nous verrons plus loin comment fonctionnent ces sonneries.

Examinons les divers cas qui peuvent se présenter, et voyons comment l'employé de poste manœuvrera dans ces circonstances.

Les appareils étant au repos, les manettes des commutateurs sont appuyées sur S et S′ (voy. la fig. 337), où viennent aboutir les fils des deux sonneries. Si le poste de Paris veut expédier une dépêche à Sèvres, il fait décrire à la manette de son manipulateur un tour entier. Le courant ainsi lancé sur la ligne pénètre dans le poste de Sèvres par le fil de gauche, en faisant dévier l'aiguille de la boussole, et va agir sur le mécanisme de la sonnerie de gauche. Averti par le bruit, l'employé met le commutateur de droite sur la borne m' ; puis, faisant décrire à la manette de son manipulateur un tour entier, il en résulte un mouvement semblable de l'aiguille indicatrice du récepteur de Paris : c'est le moyen d'annoncer qu'il est prêt à recevoir la dépêche. La dépêche expédiée et comprise, le poste de Sèvres expédie à son tour les deux lettres CO (*compris*).

Pour expédier des *chiffres*, on fait précéder l'envoi des signaux de la lettre deux fois répétée C.

Ce que nous venons de dire suffit pour faire comprendre la manœuvre qu'aurait à faire le poste de Sèvres, s'il avait à expédier une dépêche à Paris. L'explication serait de tout point identique, sauf l'ordre des manœuvres, qui se ferait à gauche, s'il s'agissait d'une correspondance entre Sèvres et Versailles.

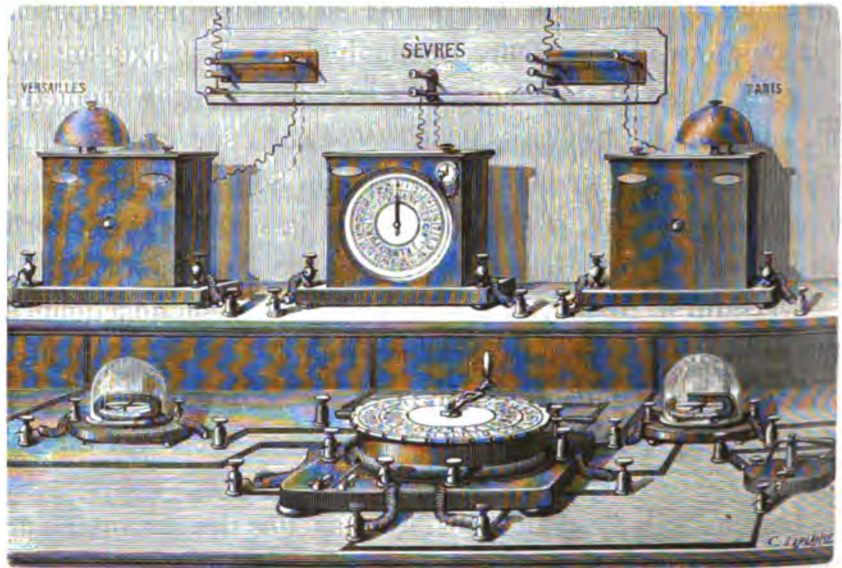


Fig. 341. — Poste d'un télégraphe à cadran.

Supposons maintenant que les postes de Paris et de Versailles veuillent correspondre directement. Le poste expéditeur envoie à Sèvres le nom de la station à laquelle il veut expédier la dépêche, en faisant suivre ce nom du nombre de minutes nécessaire à l'envoi. L'employé de Sèvres répond CO (*compris*), puis il met ses deux commutateurs sur la plaque de communication directe CD. Toute correspondance est interrompue pour le poste pendant tout le temps que passe la dépêche, temps que l'agitation des boussoles suffit, du reste, à préciser. La dépêche passée, l'employé replace ses commutateurs sur les contacts des sonneries.

§ V — Télégraphes a cadran — Systèmes Siemens et Halske; système Froment

Nous avons dit que les systèmes de télégraphes électriques à cadran sont nombreux. Nous avons déjà cité le premier en date, celui de Wheatstone, qui a été pratiqué en France. Nous nous bornerons à mentionner les systèmes suivants :

Le système Drescher, dont le transmetteur est un disque divisé en secteurs alternativement conducteurs et isolants, qui est mis en mouvement par un rouage d'horlogerie. On arrête le mouvement en appuyant sur l'une des vingt-six touches d'un cadran, celle qui correspond à la lettre à expédier. L'aiguille du récepteur s'arrête sur la même lettre.

Le système Paul Garnier est un télégraphe dont les cadrans, manipulateur ou récepteur, sont mobiles ; les signaux, lettres ou chiffres, apparaissent simultanément dans deux ouvertures ou guichets ménagés sur la circonférence.

Le télégraphe à cadran système Mouilleron présente un mécanisme particulier qui sert à régler la tension du ressort antagoniste du télégraphe Bréguet.

M. Glœsener a construit plusieurs systèmes de télégraphes à cadran, dont il serait trop long d'indiquer les principes.

Le système de M. Lippens a cela de particulier qu'il fonctionne à l'aide de courants d'induction magnéto-électriques, application qui avait été faite antérieurement aux appareils télégraphiques par Gauss et Weber en 1835, par Steinheil à Munich, par Wheatstone en 1840, et enfin en 1848 par M. Glœsener.

Citons encore le système Kramer et le système à écran de Regnard; puis entrons dans quelques détails sur deux télégraphes à cadran, celui de M. Froment et celui de MM. Siemens et Halske.

Ce dernier, construit pour les lignes télégraphiques bavaroises, est employé exclusivement sur les lignes de la grande

Société des chemins de fer russes, à Londres, à Dantzig, à Kœnigsberg, par les compagnies de pompiers, et enfin sur diverses lignes anglaises. Le moteur de l'appareil consiste dans une batterie d'aimants permanents, autour des pôles duquel tourne un cylindre de fer doux revêtu, dans le sens de ses génératrices, d'un fil isolé formant l'hélice magnétisante. La rotation de ce cylindre sur son axe développe des courants induits alternativement de sens contraires. Ces courants, lancés dans la ligne l'un après l'autre, vont agir sur l'électro-aimant du récepteur et en font osciller l'armature, qui elle-même agit sur la roue

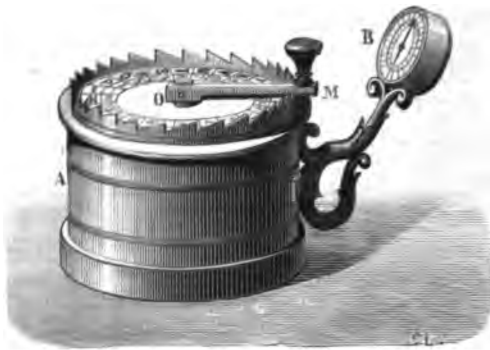


FIG. 342. — Télégraphe à cadran, système Siemens et Halske.

d'échappement portant l'aiguille indicatrice. La figure 342 représente extérieurement l'appareil complet, qui est, comme on voit, d'une grande simplicité. A est un tambour ou caisse cylindrique contenant le transmetteur ou manipulateur, et B est le récepteur. MO est la manivelle que l'expéditeur tourne en l'arrêtant successivement sur les lettres d'un cadran, selon la teneur de la dépêche. L'aiguille du cadran du récepteur B suit tous les mouvements de la manette du manipulateur.

Voici maintenant, d'une façon sommaire, quelles sont les dispositions principales du mécanisme de chacune des parties de l'appareil.

A est le disque de métal qui porte le cadran : vingt-six dentelures extérieures correspondent aux vingt-six divisions

servant de points d'arrêt à la manivelle. Sur l'axe OO', est fixée une roue dentée RR, qui engrène avec le pignon H. Quand cette roue s'avance d'un 26e de sa circonférence, c'est-à-dire quand la manivelle passe d'une lettre à l'autre, le pignon fait une demi-révolution sur lui-même, ainsi que le cylindre CC. Sur la colonne de fer BB, sont fixés par leurs pôles de même nom, des aimants permanents *a*,*a*,*a*..., rangés en deux séries, dont l'une présente au cylindre C le pôle nord d'un côté

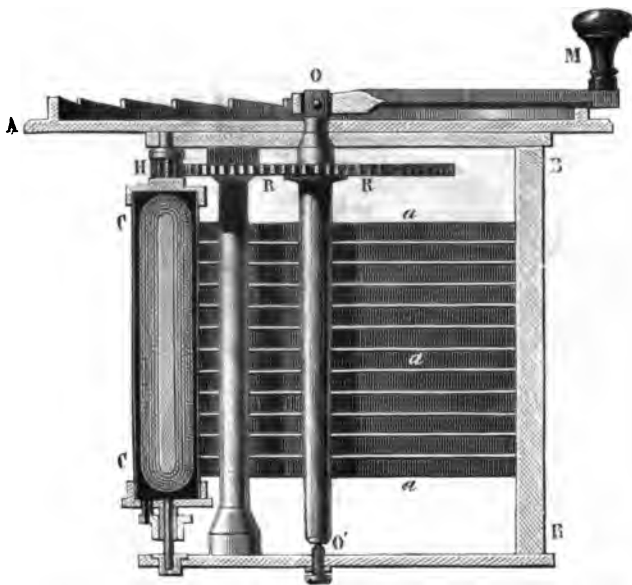


FIG. 343. — Manipulateur du télégraphe à cadran Siemens et Halske.

de ce cylindre, et l'autre série le pôle sud de l'autre côté. C'est sur ce cylindre de fer doux C, que s'enroule l'hélice magnétisante, et c'est en tournant sur lui-même, et en présentant alternativement l'une ou l'autre de ses faces, séparées par l'hélice, aux pôles des aimants *a*, que se développent les courants induits successivement lancés sur la ligne. Pour chaque révolution du cylindre C, naissent deux courants de sens contraires. Il reste à montrer comment ces courants produisent dans le récepteur les mouvements correspondants de l'aiguille indicatrice : c'est ce que la figure 344 permet de comprendre aisément.

Elle représente le mécanisme de réception placé au-dessous du cadran du récepteur. M et M' sont les deux hélices de l'électro-aimant, qui est influencé par les courants de sens contraires envoyés sur la ligne : P et P' sont les deux pôles de cet électro-aimant. Entre ces pôles passe la branche d'une fourchette de fer doux *abb'*, laquelle est constamment polarisée par son contact avec les pôles de l'aimant permanent AA'. Il résulte de là que, selon le sens du courant envoyé, la branche *a* est tantôt attirée par le pôle P et repoussée par P', tantôt attirée par P



Fig. 344. — Récepteur du télégraphe Siemens et Halske.

et repoussée par P. Ces oscillations, au nombre de vingt-six quand la manette du manipulateur fait une révolution entière, déterminent à chaque mouvement l'échappement d'une des vingt-six dents de la roue R, et par suite l'avancement d'une division de l'aiguille du cadran, qui est montée sur le même axe que la roue.

Dans le télégraphe à cadran du système Froment, le récepteur ne diffère pas de celui du système Bréguet. Mais le manipulateur se distingue par un mode particulier de transmission et d'interruption des courants. C'est toujours une roue à gorge sinueuse qui détermine par sa rotation les oscillations d'un levier L, dont une des branches *a* est engagée dans les sinuosités de la gorge. On comprend donc, sans plus de détails, comment l'autre branche du levier oscillant sert à lancer et à interrompre

les courants successifs. Ce qu'il faut expliquer, c'est la manière dont M. Froment a réalisé cette transmission de mouvement, de manière que le nombre des émissions de courant soit, pour chaque signal, celui qui convient à l'ordre de sa situation sur le cadran.

Un rouage d'horlogerie donne le mouvement à la roue B. Mais, pour que ce mouvement se produise, il faut que la dent que cette roue porte à sa circonférence soit dégagée d'un cliquet *e* avec lequel elle est en prise. Ce dégagement se fait par le jeu

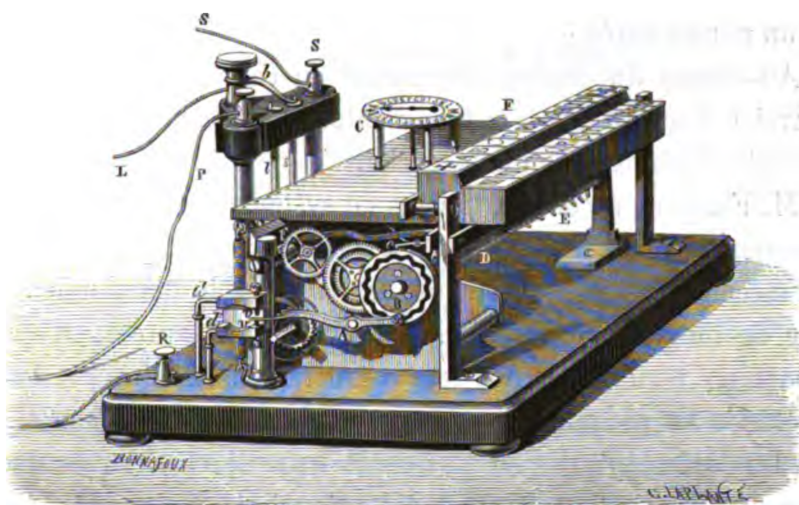


Fig. 345. — Télégraphe à cadran système Froment : manipulateur.

d'un clavier dont chaque touche correspond à une lettre ou à un chiffre. En abaissant l'une de ces touches, on fait agir sur le cliquet une barre qui le relève, et la rotation de la roue commence sous l'influence du rouage, avec une vitesse de deux ou trois tours par seconde. Au-dessous du clavier, est un arbre métallique, un cylindre DE qui tourne avec la roue B et sur le même axe : cet arbre est armé d'autant de chevilles qu'il y a de touches, formant deux séries rangées en spirales ; chaque cheville correspond à l'une des touches, et sa position angulaire sur le cylindre dépend de l'ordre de la lettre correspondante sur le cadran. Au-dessous de chaque touche, est une dent qui,

lorsque la touche est abaissée, vient buter contre la cheville correspondante, aussitôt que l'angle de rotation correspondant à la lettre est décrit. A ce moment, le mouvement s'arrête, et le nombre des émissions et des interruptions de courant effectuées est, comme on voit, en rapport avec l'ordre de la touche ou de la lettre. L'aiguille du récepteur a donc parcouru le même nombre de divisions, et dès lors s'est arrêtée sur la lettre expédiée. La touche devenue libre, le cliquet *e* s'abaisse, la dent de la roue B est de nouveau en prise, jusqu'à ce qu'une nouvelle touche abaissée la dégage, détermine une nouvelle rotation et un nouvel arrêt.

Au-dessus du clavier, se trouve un cadran dont l'aiguille marche d'accord avec le transmetteur, et sert de contrôle à l'employé qui expédie une dépêche.

M. Froment a construit, dans ce système, des appareils qui fonctionnent sans mouvement d'horlogerie ; ceux qui possèdent ce mécanisme moteur sont construits pour le fonctionnement sur de longues lignes. Mais les uns et les autres, d'après l'unanime témoignage des gens compétents, sont d'un jeu d'une précision surprenante. « Quels que soient les mouvements, dit M. Du Moncel, que l'on ait exécutés sur le clavier, de quelque manière qu'on ait abaissé les touches, dès que le doigt s'arrête sur l'une d'elles, la lettre correspondante apparaît sur le cadran. »

583

CHAPITRE IV

LA TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE

---

§ I — Les Télégraphes écrivants — Télégraphes Morse, Morse-Digney

Les télégraphes à aiguilles et les télégraphes à cadran, que nous venons de décrire, forment d'assez nombreux systèmes dont chacun a ses inconvénients et ses avantages. Aux premiers, qui sont d'une construction très-simple, il suffit de courants faibles, mais ils sont très-sensibles aux causes de perturbation. Les seconds, dont le mécanisme est bien plus compliqué, ont l'avantage d'une manipulation facile qui n'exige qu'un court apprentissage. Les uns et les autres, enfin, offrent un inconvénient grave : ils ne laissent des dépêches aucune trace sensible qui permette d'en contrôler l'exactitude, en cas de fausse interprétation, de perturbation ou de fraude.

Le télégraphe Morse, dont l'invention remonte à 1838, est le type des télégraphes écrivants. L'universalité de son adoption sur la grande majorité des lignes télégraphiques, est justifiée par la simplicité de son mécanisme et par la sûreté de ses indications. Décrivons d'abord l'appareil Morse lui-même,

et nous indiquerons ensuite les modifications qu'on lui a fait subir, et qui en ont notablement perfectionné les signaux.

Le manipulateur est représenté dans les figures 346 et 347. Il se compose d'un socle de bois sur lequel sont fixées deux bornes *b* et *d*, et au milieu une courte colonne à fourchette, entre

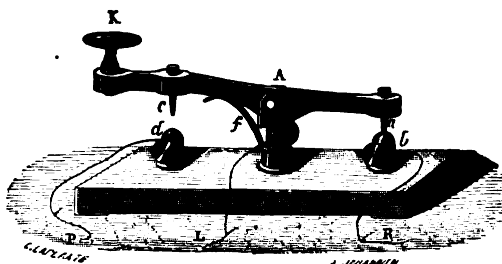


FIG. 346. — Manipulateur Morse.

les branches de laquelle un levier A peut osciller dans le plan vertical. A la borne *d* se rattache le fil P, qui vient du pôle positif de la pile; *b* communique avec le fil R qui aboutit au récepteur, et la colonne du milieu reçoit le fil de ligne L. Le

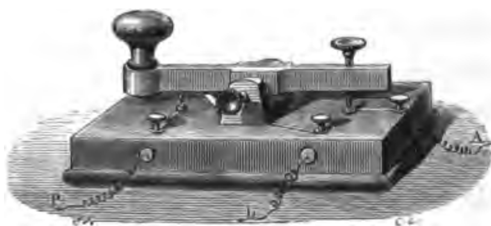


FIG. 347. — Manipulateur Morse, autre modèle.

levier A est muni, à chacune de ses extrémités, de deux vis *a* et *c*, dont chacune peut appuyer sur la borne correspondante *b* ou *d* située au-dessous.

Dans la position de repos ou d'attente, le ressort *f* suffit à éloigner la vis *c* du contact *d*, et alors c'est la vis *a* qui touche *b*. C'est la position de réception; car, sitôt qu'un courant lancé dans la ligne arrive au poste, il passe de L dans le

levier du manipulateur, et, par *a* et *b*, dans le récepteur. Si, au contraire, il s'agit d'expédier une dépêche, c'est-à-dire une série de courants discontinus, l'employé n'aura qu'à appuyer sur la poignée de bois K du levier, de manière à vaincre la résistance du ressort, à éloigner *a* du contact *b*, et à amener au contraire *c* au contact de *d*. Au moment où ce dernier contact a lieu, le courant passe de P dans le manipulateur, et de là dans le fil de ligne L; le courant lancé est interrompu dès que le contact cesse. Rien de plus simple, on le voit, que le manipulateur Morse dont les figures 346 et 347 représentent deux modèles.

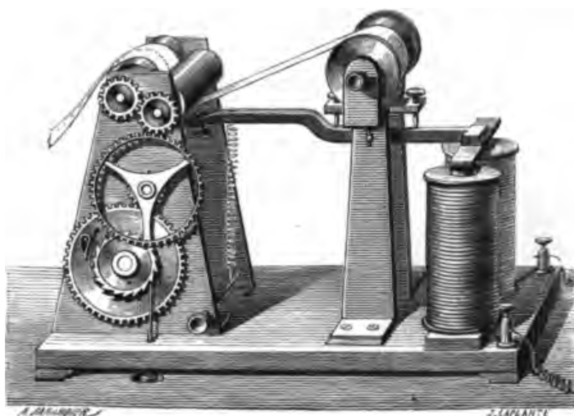


FIG. 348. — Récepteur du télégraphe Morse.

Le récepteur (fig. 348) n'est pas beaucoup plus compliqué. C'est un électro-aimant dont la bobine magnétisante forme, d'un côté, le prolongement du fil de ligne, et, de l'autre, aboutit à la terre. La série de courants lancés dans la ligne par le poste expéditeur vient aimanter et désaimanter le fer doux de l'électro-aimant dans le même ordre, et avec les mêmes alternatives et les mêmes durées que les signaux du manipulateur. L'armature de fer doux, en forme de levier, du récepteur, est donc attirée, puis ramenée à sa position par un ressort antagoniste, ou repoussée quand ce courant cesse. Ce levier oscille autour d'un axe horizontal et est limité dans ses oscillations par deux vis. Son extrémité opposée aux pôles de l'électro-aimant porte une

pointe qui vient appuyer sur une bande de papier, et y laisse une empreinte gaufrée dont la longueur est proportionnelle à la durée du passage du courant. Les intervalles de ces marques sont au contraire d'autant plus grands, que l'interruption du courant est elle-même plus longue. Un rouage d'horlogerie, qu'on met à volonté en mouvement en agissant sur un encliquetage, déroule d'une façon continue le papier qui est enroulé sur un cylindre, et se déroule sur deux autres cylindres, à mesure que le style y a imprimé la série de traits qui constitue la dépêche.

A l'origine, le levier du récepteur portait un crayon dont la pointe traçait des traits sur le papier; mais la pointe s'émoussait promptement, et c'est pour cette raison que l'inventeur a substitué à l'empreinte à la mine de plomb le gaufrage produit par une pointe métallique. A la vérité, ce dernier procédé exige une force assez grande que le courant de la pile de ligne était généralement trop faible à produire. De là, la nécessité d'employer à la station de réception une pile locale et un relais.

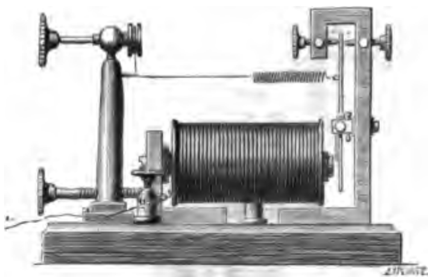


Fig. 349. — Relais Froment.

On nomme *relais* un appareil supplémentaire destiné à suppléer à la force du courant de la ligne, courant suffisant pour la transmission des signaux, mais, comme on vient de le dire, insuffisant pour produire la marque matérielle des signaux. On va comprendre aisément le rôle du relais en suivant, sur la figure 350, la marche du courant qui parvient au poste de réception par le fil de ligne.

Ce courant, qui pénètre en c dans le manipulateur, gagne le relais R′ par a, et aboutit à un électro-aimant qui se trouve polarisé par son action. L'armature, ou levier mobile, est attirée, et va au contact de la vis de gauche, donnant passage au courant qui gagne la bobine du récepteur, tout en fermant

le circuit de la pile locale; l'action de cette dernière pile va donc s'ajouter à celle du courant de la ligne pour mettre en mouvement le levier écrivant du récepteur R. Le courant de ligne est-il interrompu, la polarisation de l'électro-aimant du relais cesse, l'armature est ramenée au contact de la vis de droite, et le circuit de la pile locale est ouvert, en même temps que le récepteur ne reçoit plus le courant de la ligne.

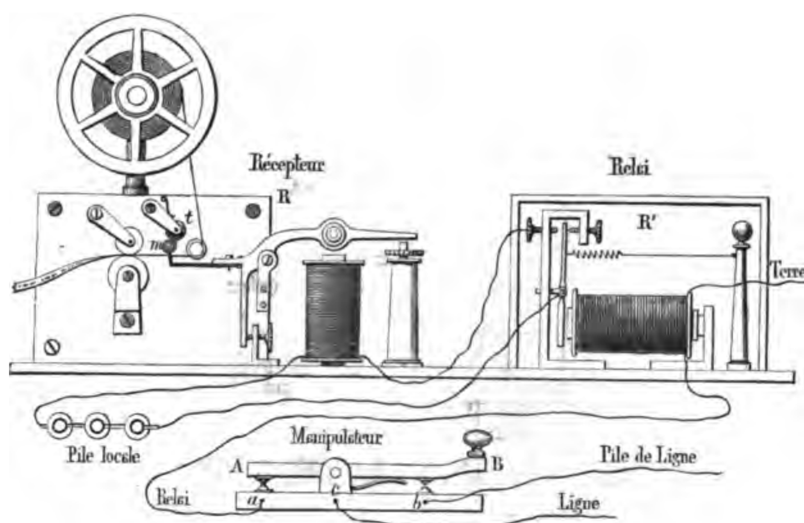


FIG. 350. — Appareil télégraphique Morse avec relais.

Il y a des relais de systèmes différents; celui qu'on voit dans la figure 350, et qui est représenté à part dans la figure 349, est dû à M. Froment.

Le récepteur du télégraphe Morse, tel qu'il fonctionne sur les lignes télégraphiques françaises, a été modifié, perfectionné par M. Digney, de manière à substituer au gaufrage des signes tracés à l'encre et exigeant moins de force pour leur empreinte. Aussi le système Morse-Digney peut-il fonctionner sans relais. Les figures 351 et 352 en donnent la disposition générale, ainsi que les détails essentiels. Suivons ces détails sur la figure 351.

K est le rouleau-magasin qui fournit la bande de papier *ppp* destinée à recevoir la dépêche, et dont la rotation est donnée

par le rouage d'horlogerie du récepteur. Le même rouage fait tourner le cylindre H contre le tampon L chargé d'encre grasse. BB′ est le levier qui est mis en action par le passage du courant, et dont la pointe *l* appuie le papier contre le cylindre encré. La pointe ou le trait qui, dans le système Morse ordi-

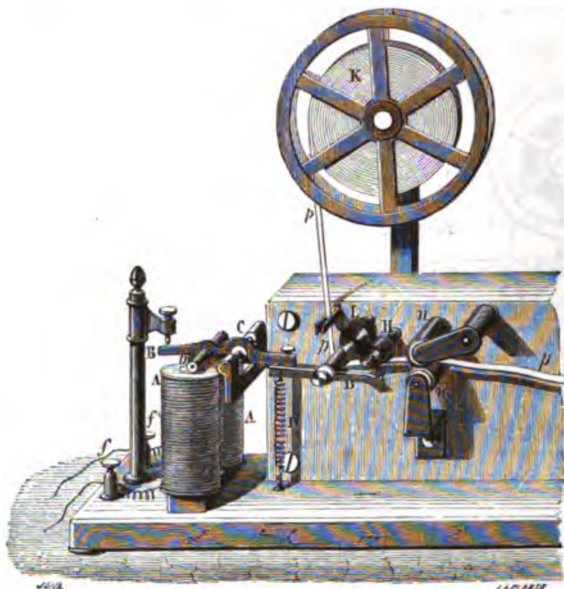


Fig. 351. — Récepteur du système Morse-Digney.

naire, était marqué dans le papier même, est donc ici simplement tracé à l'encre; il laisse une empreinte plus visible en même temps qu'il exige, comme nous l'avons déjà dit, une force motrice moindre.

L'appareil Digney peut se passer de relais, si la ligne a une faible longueur. On y adjoint des relais quand la ligne est longue, ou encore pour agir sur les marteaux des sonneries, qui sont, il est inutile d'insister, des appareils communs à tous les systèmes télégraphiques. La figure 352 représente l'intérieur d'un poste télégraphique Morse–Digney sans relais. A droite, on voit le manipulateur, qui communique avec la boussole et le parafoudre. Au centre est le récepteur, dont le rouage d'hor-

logerie est muni de sa clef de remontage. A gauche, et par derrière, se trouve la sonnerie.

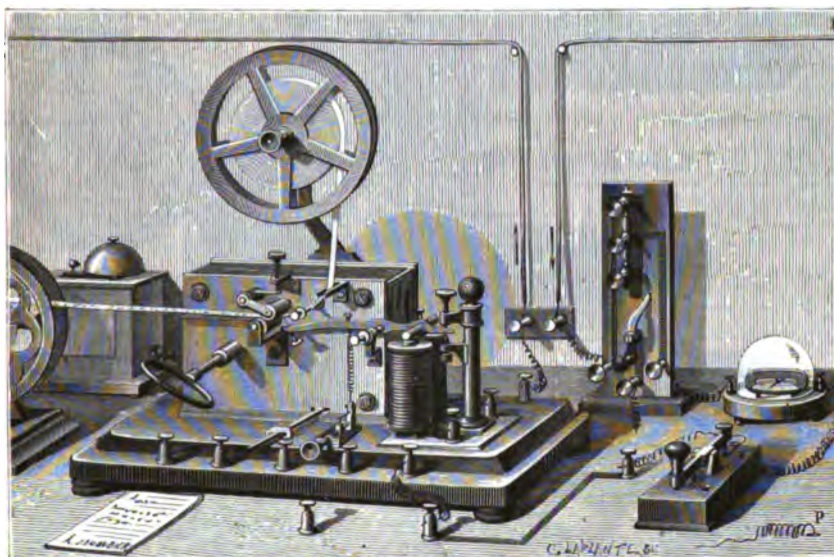


FIG. 352. — Poste télégraphique du système Morse-Digney.

Nous avons déjà dit que le système Morse est adopté sur un grand nombre de lignes télégraphiques, à l'étranger comme

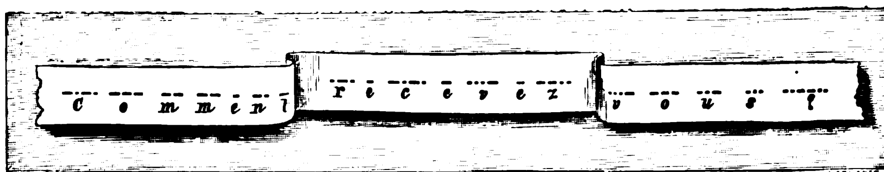


FIG. 353. — Fac-simile d'une dépêche Morse.

en France. En vertu d'une convention généralement adoptée, voici (fig. 354) quel est le vocabulaire de ce système pour les lettres, les chiffres, les signes de ponctuation et les signaux réglementaires. La figure 353 reproduit le *fac-simile* d'une dépêche et sa traduction dans l'alphabet ordinaire.

ALPHABET MORSE

a, ä, b, c, d, e, é, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, ö, p, q, r, s, t, u, ü, v, x, y, z, w, ch

CHIFFRES

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0

PONCTUATIONS, SIGNAUX CONVENTIONNELS

. , ; : ? ! - '

Barre de division
Attaque
Compris
Erreur
Final
Attente
Télégraphe
Reçu

FIG. 354. — Vocabulaire du système Morse.

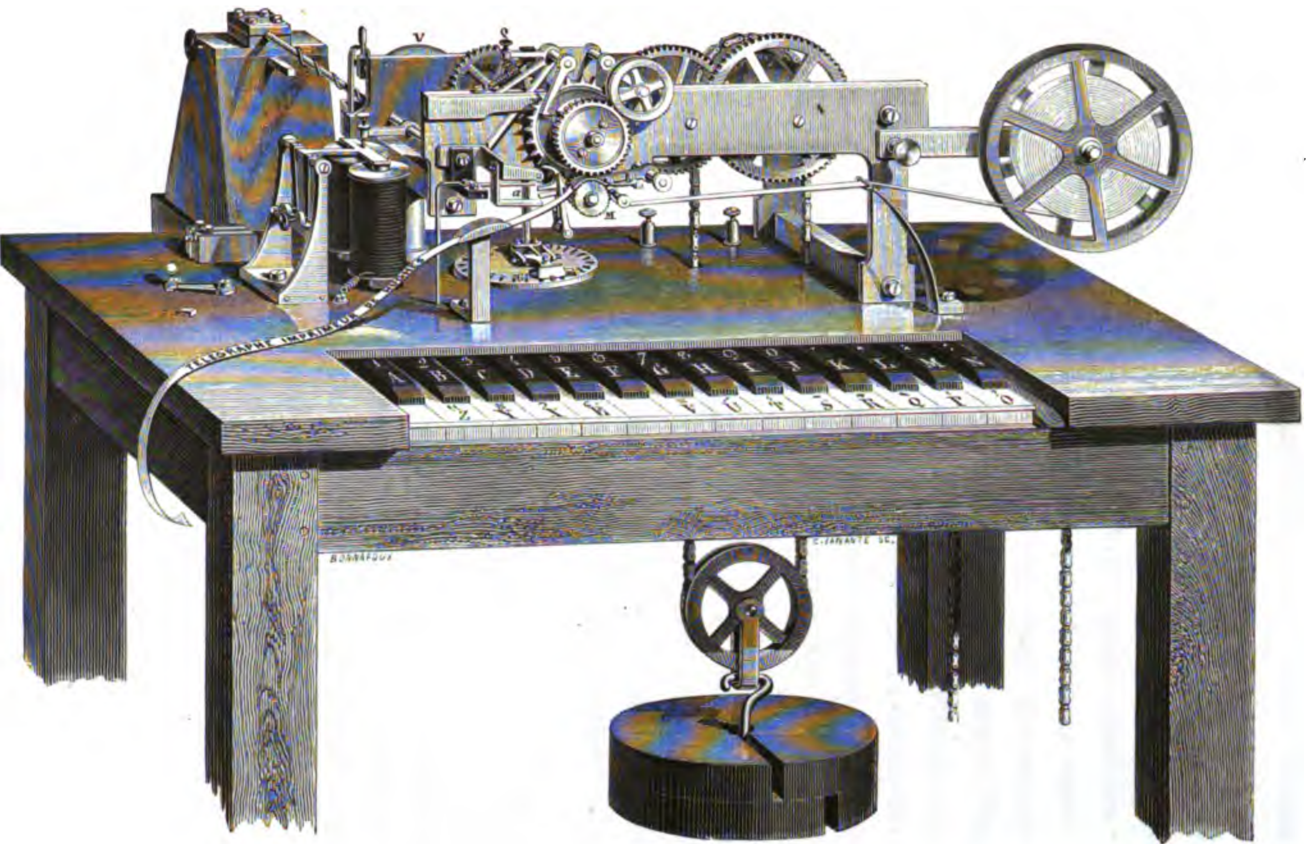


PLANCHE XXI — TÉLÉGRAPHE ÉLECTRIQUE IMPRIMEUR DE HUGHES

§ II — Les Télégraphes imprimeurs — Système Hughes

Les divers systèmes de télégraphie électrique que nous avons étudiés jusqu'à présent ont tous, malgré la diversité de leur construction et des procédés employés pour produire des signaux, un principe commun qu'on pourrait énoncer ainsi :

Envoi par le poste expéditeur d'une série déterminée de courants, et d'interruptions de courants qui produisent dans les appareils du poste récepteur une suite de mouvements constituant les signaux convenus. Les mouvements du manipulateur et ceux du récepteur peuvent être ou non identiques ; mais l'essentiel est qu'il y ait entre eux une relation, sinon de simultanéité absolue, du moins de synchronisme, de sorte qu'il y ait identité parfaite entre le signal envoyé et le signal reproduit : cette dernière condition, le synchronisme des mouvements du manipulateur et du récepteur, est surtout indispensable dans le télégraphe imprimeur de Hughes que nous allons décrire maintenant.

L'idée d'obtenir la dépêche imprimée n'est pas nouvelle. Dès l'origine de l'invention de la télégraphie électrique (1841), Wheatstone prenait un brevet pour un système qui permettait d'imprimer en lettres ordinaires, sur une bande de papier, les termes de la dépêche. Depuis, plusieurs inventeurs ont poursuivi la même idée et l'ont réalisée avec plus ou moins de succès : citons les systèmes de MM. Vaïl, Bain, Brett, Du Montcel, Freitel, Theyler, Dujardin, Thomson, Digney, etc. Mais le plus parfait de tous ces systèmes, celui surtout qui a résolu le problème de la rapidité la plus grande de transmission, est le télégraphe imprimeur du professeur américain Hughes. C'est un appareil plus compliqué et plus coûteux que l'appareil Morse ; d'un entretien et d'une manipulation plus difficiles, qui exige des employés plus exercés, mais qui offre en revanche sur ce système l'avantage, fort important sur les lignes où la cir-

culation télégraphique est très-active, d'une transmission en moyenne trois fois plus rapide que le télégraphe Morse. Le système Hughes n'exige en effet qu'une transmission de courant au lieu de trois ou quatre, pour chaque lettre ou signal.

Le système Hughes offre cette particularité que, le manipulateur étant en fonction dans le poste expéditeur, le récepteur de ce poste fonctionne en même temps et de la même manière que le récepteur du poste où est transmise la dépêche : par conséquent, cette dépêche est imprimée à la fois au départ et à l'arrivée, de sorte qu'il en résulte un double contrôle. Si donc nous parvenons à faire bien comprendre comment a lieu cette impression dans l'appareil du poste expéditeur, il ne nous restera plus qu'à montrer de quelle manière est obtenu le synchronisme des mouvements de l'appareil, à la station d'arrivée, par le fait des envois et des interruptions successifs du courant sur la ligne.

La planche XXI représente l'appareil complet, où manipulateur et récepteur sont en partie confondus. Un mouvement d'horlogerie d'une grande puissance, mis en action par un poids moteur d'au moins 50 kilogrammes, est disposé sur une table en avant de laquelle on voit le clavier du manipulateur, composé de vingt-huit touches, dont vingt-six sont affectées aux lettres, chiffres et autres signes marqués sur leur surface visible, et deux servent, l'une à produire les blancs ou intervalles des mots, l'autre à imprimer à volonté, s'il y a lieu, le signe, chiffre ou signal, que chaque touche porte marqué au-dessus de la lettre alphabétique.

Le rouage d'horlogerie, étant mis en mouvement, fait tourner avec des vitesses différentes trois axes ou arbres dont deux sont horizontaux et l'autre vertical. Le premier de ces arbres est l'*axe des types*, qui porte extérieurement une roue T (fig. 355 et 356) sur le pourtour de laquelle sont gravées en relief les lettres de l'alphabet, et, dans les intervalles les chiffres, signes de ponctuation ou autres signaux nécessaires à la composition des dépêches. En arrière de la roue des types et sur le même axe,

est la *roue correctrice* T′, dont la fonction est de rétablir le synchronisme des mouvements, au cas où il y aurait retard ou avance des deux récepteurs l'un sur l'autre. Deux autres roues dentées servent à transmettre le mouvement aux deux autres axes.

Le second arbre, *axe imprimeur* ou *axe des cames*, tourne avec une vitesse beaucoup plus considérable que l'axe des types. Il porte une série de quatre cames u, w, x, y (fig. 355), dont nous verrons la fonction, l'une d'elles ayant pour principal objet de

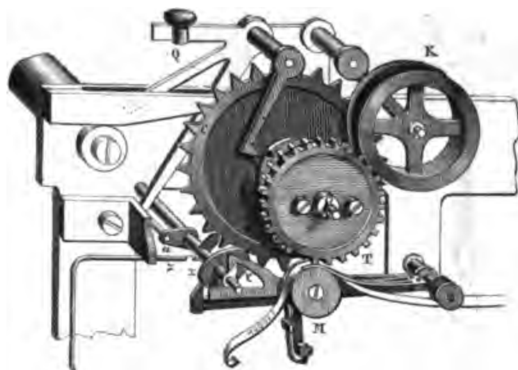


FIG. 355. — Relation entre l'axe des types et l'axe imprimeur.

presser le rouleau imprimeur M contre le papier, et celui-ci contre les lettres de la roue des types encrées par un tampon K. Le second arbre est divisé en deux parties réunies par un encliquetage, de sorte que la partie dont le mouvement détermine l'impression ne marche qu'autant qu'il y a eu abaissement des touches du clavier manipulateur, production de courant et action d'un mécanisme particulier résultant du passage du courant.

Le troisième arbre a, qui est vertical (planche XXI), reçoit son mouvement de l'axe des types par une roue d'angle, et, en tournant, fait marcher un chariot sur un disque horizontal G, de façon à faire décrire à ce chariot une circonférence entière dans le même temps que la roue des types effectue une rotation complète. Le

disque G est percé de vingt-huit trous, c'est-à-dire d'autant de trous qu'il y a de touches dans le clavier et de lettres sur le pourtour de la roue des types. Or, le mouvement des diverses pièces du mécanisme est tellement réglé, qu'au moment précis où le chariot passe au devant d'un trou correspondant à une touche déterminée, c'est la lettre marquée par cette touche qui se trouve, sur la roue des types, au bas de cette roue, c'est-

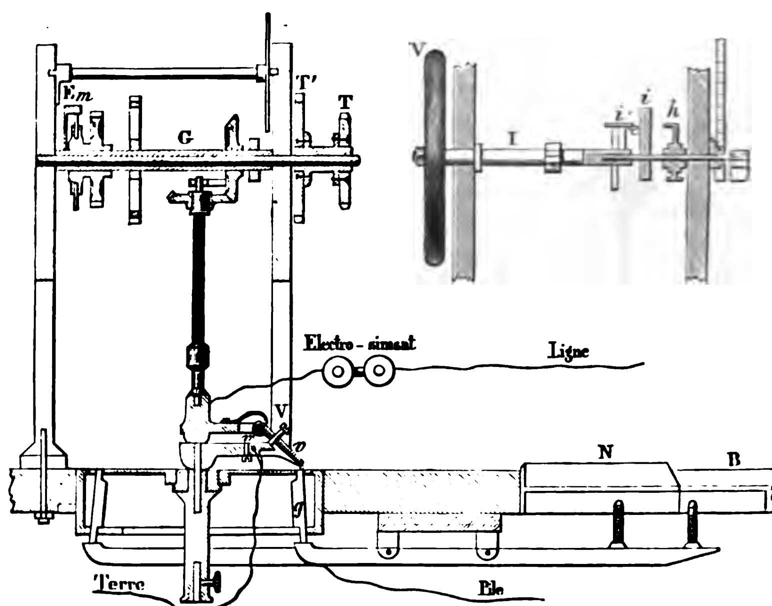


FIG. 356. — Mécanisme des touches; rôle de l'arbre vertical et du chariot dans le télégraphe Hughes.

à-dire en face du point du rouleau imprimeur qui va être pressé par le fait de l'action de l'axe des cames. Mais comment cette position du chariot, comment le jeu du clavier déterminent-ils l'action de cet axe? C'est ce qu'il faut expliquer. La figure 356 va nous le permettre. C'est une coupe faite dans l'appareil par le plan qui contient à la fois l'axe des types et l'arbre vertical *a*, qui porte le chariot.

L'arbre vertical est formé de deux parties métalliques qu'isole un cylindre d'ivoire, et le bras de cet arbre constituant le cha-

riot est lui-même composé de deux parties *v* et *v'*, qui sont reliées par une vis V. La pièce *v*, dans le mouvement de rotation de l'axe, passe précisément au-dessus des trous du disque; tant qu'elle reste abaissée dans la position marquée par la figure; le courant voltaïque arrive dans la partie inférieure de l'arbre; et, par l'intermédiaire de la vis V, va se perdre dans la terre (voyez aussi la figure 357, poste récepteur). Mais une touche du

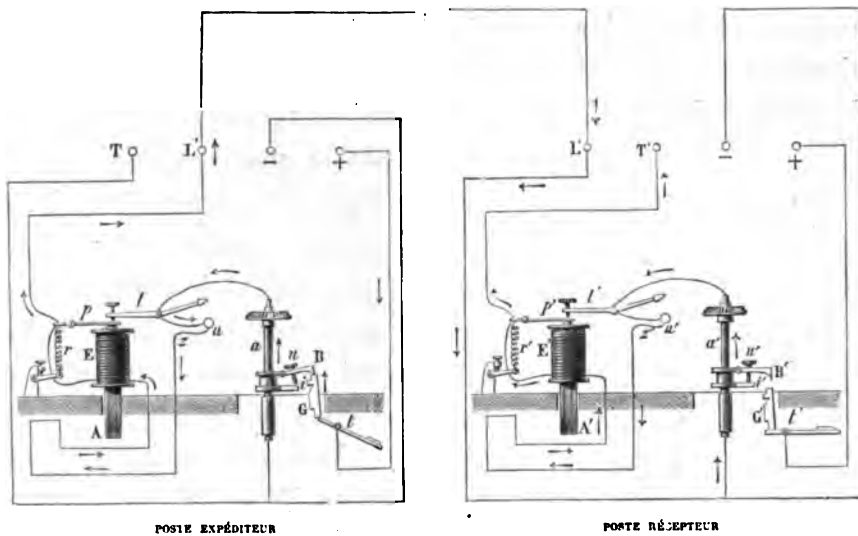


Fig. 357. — Émissions de courant dans le télégraphe Hughes.

clavier est-elle abaissée, son extrémité soulève un goujon *g*, qui lui-même relève la pièce *v* du chariot et isole les deux parties de l'arbre *a*. Alors le courant, partant du pôle positif de la pile, suit le chemin indiqué par les flèches (fig. 357), en passant par les points *t*GB*a*..., pénètre dans les spires de l'électro-aimant E, et de là dans le fil de ligne L : le courant est lancé et va produire son effet dans l'appareil du poste récepteur. A chaque abaissement d'une touche, pareil effet se produit, et, dès qu'elle se relève, le courant est interrompu, l'effet cesse.

Voilà pour les émissions et les interruptions de courant.

Il faut examiner maintenant en quoi consiste l'action alternative du courant, soit dans l'appareil expéditeur, soit dans l'appa-

reil récepteur, dont les mouvements sont d'ailleurs absolument synchroniques. L'électro-aimant E (fig. 357) a une disposition spéciale : il est formé de deux pièces de fer doux autour desquelles s'enroulent les bobines, et qui sont placées sur les pôles d'un aimant permanent A en fer à cheval. Quand le courant ne passe pas, la palette du levier p est attirée par les armatures de l'électro-aimant, et s'appuie contre elles ; mais aussitôt que le courant passe, comme il agit en sens contraire du magnétisme permanent, le fer doux est désaimanté ; le levier p cède à l'action d'un ressort r et quitte les armatures. Dans son mouvement, la palette relève un levier l qui lui-même agit sur l'encliquetage de la partie immobile de l'axe des cames, et ce dernier axe enfin participe au mouvement des autres axes ; puis, après un tour effectué, le cliquet se dégage et l'axe s'arrête.

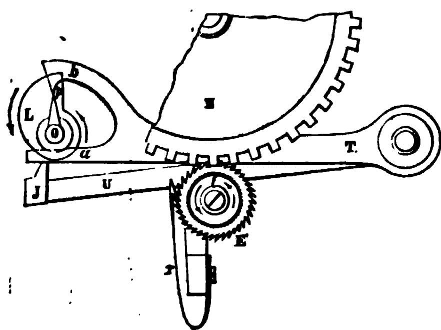


Fig. 358. — Mécanisme de l'impression dans le système Hughes.

Voyons donc comment cet axe a déterminé l'impression de la lettre dont la touche abaissée a produit, avec l'envoi du courant, les effets mécaniques que nous venons de décrire.

L'axe imprimeur porte une came aiguë p (fig. 358) qui, à chaque mouvement de rotation, vient buter contre la dent b d'un levier ab T et la soulève ; ce levier force ainsi le rouleau imprimeur M à venir appuyer la bande de papier contre la lettre encrée de la roue des types qui passe en ce moment. Or, cette lettre, à chaque passage du courant, est précisément celle dont la touche abaissée a déterminé le soulèvement du goujon dans le trou du disque D et la pièce du chariot passant au-dessus. La lettre est imprimée au vol, pour ainsi dire, puisque la roue des types ne cesse pas son mouvement. Les trois autres cames de l'axe imprimeur servent : l'une, en forme de limaçon, à abaisser le

levier JU, qui porte un cliquet *r* et fait marcher d'une dent la roue à rochet E : la bande de papier avance ainsi ; la troisième came sert à agir sur les dents de la roue correctrice, de manière à réparer les écarts, retards ou avances de cette roue, et à rétablir la concordance parfaite entre la roue des types et le chariot; enfin une quatrième came sert à replacer les appareils au repère, c'est-à-dire au blanc de la roue des types.

Voici comment on procède pour l'expédition d'une dépêche :

L'employé du poste expéditeur, pour attaquer le poste de la ligne auquel elle est destinée, soulève le frein du volant du rouage d'horlogerie, qui se met en marche ; puis il abaisse une touche blanche, ce qui produit le mouvement de sonnerie dans le poste récepteur. Celui-ci, averti, met son appareil en marche, et simultanément les deux employés, appuyant sur la pédale Q, règlent leurs appareils, c'est-à-dire mettent les roues des types au blanc ; puis ils essayent s'il y a synchronisme, en répétant un certain nombre de fois une même lettre, la lettre A par exemple. S'il y a accord de vitesse, cette lettre se répète toujours la même ; sinon, c'est la lettre précédente ou la suivante qui succède à l'A, et marque le retard ou l'avance. Le réglage se fait en agissant sur un régulateur à pendule conique ou sur une lame vibrante.

Les appareils réglés, le poste expéditeur envoie successivement, en jouant sur le clavier, les lettres dont se compose la dépêche : celle-ci s'imprime simultanément dans les deux postes.

On voit, par cette description déjà longue, bien que nous ayons dû négliger certains détails du mécanisme, que le télégraphe imprimeur de Hughes est notablement plus compliqué que les systèmes décrits plus haut. Mais cette complication, nécessitée par toutes les difficulés du problème à résoudre, ne fait que rendre plus admirable le résultat obtenu, résultat véritablement merveilleux, quand on songe que la rapidité de transmission est deux ou trois fois plus considérable que celle de l'appareil Morse. Tandis qu'on obtient en moyenne, avec ce

dernier, douze à quinze mots par minute, le télégraphe Hughes permet d'en imprimer trente à quarante dans le même temps.

§ III — Les Télégraphes autographiques — Systèmes Caselli et Meyer

Nous avons vu que l'idée d'utiliser les propriétés électrolytiques de la pile pour transmettre des signaux remonte aux premières années de ce siècle : les noms de Coxe, de Sœmmerring et de Schweigger se rattachent à ces premières tentatives. Les signaux étaient indiqués dans le télégraphe du second de ces savants par le dégagement de bulles d'hydrogène. En 1839, E. Davy se servit des réactions électro-chimiques pour imprimer les signaux sur une feuille de papier ou d'étoffe convenablement préparée. Douze ans plus tard, M. Bain construisait un télégraphe écrivant, basé sur la propriété qu'a le courant voltaïque de décomposer le cyanure de potassium, et de produire un composé coloré, le bleu de Prusse, qui se dépose sur le papier du récepteur, toutes les fois que le courant passe et pendant toute la durée de ce passage. Les appareils manipulateur et récepteur étant identiques à ceux du télégraphe Morse, M. Bain obtenait sur la bande de papier des points ou des traits bleus plus ou moins longs, dont la combinaison fournissait les éléments de la dépêche. A l'origine, M. Bain faisait décrire au style métallique du récepteur une spirale serrée sur une feuille de papier ordinaire, mais le principe était le même.

D'autres télégraphes électro-chimiques ont été inventés depuis, mais notre but ne peut être de les décrire. Nous voulons seulement rattacher ces systèmes aux appareils connus aujourd'hui sous les noms de *télégraphes autographiques* ou de *pantélégraphes*, et qui ont reçu la sanction d'une expérience vraiment pratique.

Il ne s'agit plus, dans ces télégraphes imprimeurs d'un nouveau genre, de transmettre des signaux qui laissent, comme les télégraphes écrivants, des traces de la dépêche, ou même qui la reproduisent et l'impriment en caractères alphabétiques. Le problème posé, et résolu avec une ingéniosité merveilleuse, consistait à obtenir au poste récepteur la reproduction fidèle, le vrai *fac-simile* de l'écriture de la dépêche, au besoin des dessins, cartes, plans, portraits. C'est un véritable autographe que reçoit ainsi de l'expéditeur même celui à qui la dépêche est destinée,

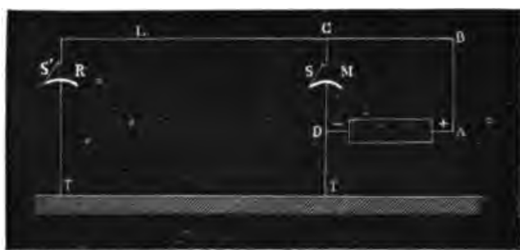


Fig. 359. — Principe du télégraphe autographique Caselli.

de manière à avoir entre les mains, au besoin, un document authentique. Quoi de plus extraordinaire, au premier abord, que la solution d'un tel problème et cependant, on va voir que rien au fond n'est plus aisé à comprendre que les moyens par lesquels cette solution a été réalisée.

Supposons qu'on ait disposé, dans les deux postes expéditeur et récepteur, deux plaques de cuivre M, R (fig. 359), communiquant en T avec le sol. Sur la plaque M de la station du départ est posée une feuille de papier métallisé : c'est sur cette feuille que la dépêche est écrite de la main même de l'expéditeur en encre grasse, isolante. A l'autre station, sur la plaque R, on place une feuille de papier imprégnée préalablement de cyanure jaune de potassium et de fer. Deux styles de fer s, s', se trouvent en relation avec la pile et avec le fil de ligne, et peuvent se mouvoir en décrivant synchroniquement, avec la même vitesse, des lignes parallèles très-rapprochées sur les deux

feuilles de papier. Nous verrons plus loin comment le mouvement est donné à ces styles, et comment il est régularisé par des pendules qui oscillent simultanément dans chacune des deux stations. Un autre mouvement permet aux feuilles de se déplacer, au fur et à mesure que les lignes dont nous parlons se trouvent tracées, de sorte que si le style *s* parcourt totalement sur la plaque du manipulateur la surface du papier où se trouve écrite la dépêche, le style *s'* aura précisément, dans le même temps, parcouru une surface égale sur le papier chimique de la plaque du poste récepteur.

Du système de communication électrique marqué par la figure, il résulte ceci : toutes les fois que le style *s* se trouve sur la partie métallique ou conductrice de la dépêche, le courant de la pile est lancé dans le circuit ABCD, qui offre à l'électricité une résistance beaucoup plus faible que le fil de ligne, dont la longueur est relativement considérable; le courant s'écoule dans le sol, à la station de départ. L'appareil récepteur n'est pas influencé, dès lors ne reçoit rien.

Au contraire, le style du manipulateur vient-il à toucher les parties isolantes, c'est-à-dire à reposer sur les traits mêmes de l'écriture ou du dessin de la dépêche, le circuit est fermé en ABCD, mais il est ouvert sur la ligne, et un courant est lancé dans le style *s'* du récepteur. Sous l'influence de ce courant, le point de la feuille cyanurée par où passe le courant pour aller au sol, est influencé chimiquement; il y a décomposition du cyanure, production de bleu de Prusse et impression sur le papier. Cette impression se reproduit toutes les fois que le style du manipulateur rencontre des parties marquées à l'encre isolante; et le nombre des traits, leur longueur, sur chaque ligne parcourue synchroniquement par les deux styles, seront identiques à la station d'arrivée et à celle de départ. La dépêche se trouvera donc identiquement reproduite sur le papier cyanuré en traits bleus; la seule différence avec l'original consistera en ce que les lignes successives des styles n'étant pas absolument en contact, les traits de la dépêche reproduite

ne seront point rigoureusement continus. L'effet sera analogue à celui que produiraient, sur une gravure en relief, sur un bois, les tailles parallèles et très-fines dont le graveur surcouperait toute la surface laissée en relief sur le bois. La figure 360 donne une idée très-exacte de cette différence; mais on voit que la forme générale de la dépêche primitive n'est nullement altérée, et qu'à juste titre le télégraphe de ce système peut s'appeler *télégraphe autographique*.

Le télégraphe dont on vient de décrire le principe est celui de M. Caselli. Comme rien n'empêche de reproduire ainsi toutes sortes d'écritures, de dessins, en un mot de signes quelconques,



FIG. 360. — Fac-simile d'un dessin reproduit par le pantélégraphe Caselli.

pourvu qu'ils soient tracés sur le papier métallique adopté, on comprend la raison de la dénomination de *pantélégraphe* donnée aux appareils de ce système.

Entrons maintenant dans quelques détails sur la manière dont les dispositions précédentes sont réalisées, et sur le mécanisme du récepteur et du manipulateur.

Le moteur du pantélégraphe Caselli est un pendule dont la tige métallique, longue de 2 mètres, est suspendue à un solide bâti de fonte, et dont la lentille est une masse rectangulaire de fer doux, du poids de 8 kilogrammes. A la partie moyenne de la tige sont articulées deux bielles, destinées à communiquer le mouvement oscillatoire du pendule, d'un côté à l'appareil *transmetteur*, de l'autre à l'appareil *récepteur*. Comme ces deux appareils fonctionnent séparément, l'une des bielles est déta-

chée quand l'autre reçoit son mouvement de va-et-vient. C'est cette bielle qui détermine le mouvement du style sur la surface du transmetteur, là où se trouve placée la dépêche. Voici comment.



FIG. 361. — Pantélégraphe Caselli.

La bielle est elle-même articulée au levier qui porte le style. Dans ses oscillations successives, elle fait décrire à ce levier et à la pointe traçante une série d'arcs de cercle parallèles entre eux et à la surface de la feuille cylindrique de métal sur laquelle est appliqué le papier métallisé de la dépêche (fig. 361).

Quand le pendule fait une oscillation complète, le style curseur se meut de gauche à droite et parcourt la dépêche dans toute sa largeur. A la fin du mouvement, le curseur vient rencontrer un butoir, et le choc fait tourner la tige qui porte le style, de sorte que ce dernier se trouve soulevé et éloigné du papier pendant toute la durée de l'oscillation suivante. L'appareil ne fonctionne donc que pendant une moitié du mouvement du pendule. La raison de cette disposition vient de ce que l'expérience

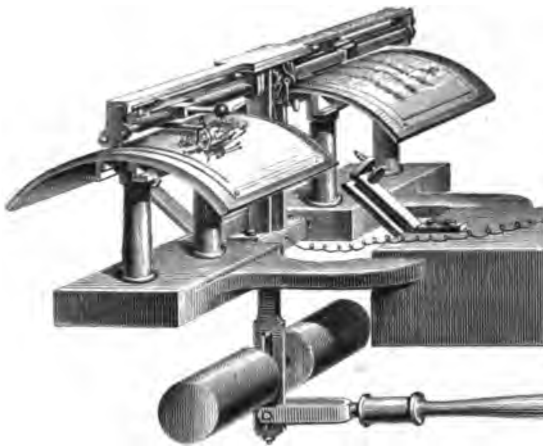


FIG. 362. — Transmetteur et récepteur du pantélégraphe Caselli.

a montré qu'il n'y avait pas identité entre les effets produits par les oscillations de sens contraire ; mais, pour utiliser ces oscillations, l'appareil transmetteur est double : seulement, les mécanismes sont renversés, et il en est de même pour les récepteurs. Il résulte de là qu'aucun temps n'est perdu, et que deux dépêches peuvent être, l'une envoyée et l'autre reçue simultanément.

Une condition essentielle du bon fonctionnement du pantélégraphe Caselli, c'est qu'il y ait un synchronisme parfait entre les mouvements du pendule de la station de départ et du pendule de la station d'arrivée. Non-seulement leurs oscillations doivent être isochrones, mais elles doivent avoir des amplitudes

parfaitement égales, afin que les styles se meuvent aux deux stations simultanément, et soient animés au même instant de vitesses égales. Ce résultat est atteint par la disposition suivante. A chacune des extrémités de l'arc que décrit la masse de fer du pendule, se trouve un électro-aimant dirigé dans le sens même de l'arc, et ayant ses armatures en face de la masse de fer, quand celle-ci parvient au bout de chaque oscillation, à droite ou à gauche. A ce moment, un courant lancé par un chronomètre régulateur — c'est celui qu'on voit à gauche et au-dessus de la figure 361 — vient animer l'électro-aimant et son armature, qui attire la masse du pendule, l'immobilise un instant, et, par conséquent, le ramène, à chaque oscillation, au même écart. L'interruption du courant se fait par le mouvement même du pendule du chronomètre, qui, à chaque double oscillation, écarte un petit ressort et ouvre le circuit. Le commutateur, qui a pour fonction d'ouvrir et de fermer le courant, reçoit lui-même son mouvement d'une pièce articulée à frottement dur sur la tige du pendule.

Ainsi le réglage des deux pendules, aux stations de départ et d'arrivée, se trouve dépendre de la concordance des mouvements des pendules chronométriques qui accompagnent les premiers. Ces chronomètres régulateurs, dont les pendules marchent à une vitesse double des pendules du pantélégraphe, sont réglés séparément avec toute l'exactitude désirable, exactitude que rendent facile les mécanismes d'horlogerie qui les composent.

Le papier cyanuré sur lequel s'impriment les dépêches doit être préparé avec soin, et maintenu à un degré d'humidité convenable. La qualité du papier lui-même est importante. Quant aux feuilles métallisées, qui servent à écrire les dépêches avec une encre particulière, ce sont des feuilles de papier blanc soigneusement argentées à la presse, avec de larges marges. Elles portent trois raies : l'une servant de point de repère pour le départ du style curseur, les deux autres marquant les limites de la dépêche.

Rien de plus simple, du reste, que le fonctionnement du pantélégraphe. La dépêche écrite, on la place sur la surface du cylindre transmetteur. L'employé du poste fait les signaux d'avertissement (sonnerie ou autre), puis met en marche le pendule. La transmission de la dépêche se fait automatiquement, sans que l'employé ait besoin d'aucune manipulation, et, par conséquent, sans être obligé d'acquérir de connaissances spéciales. Comme on peut envoyer simultanément deux dépêches, et qu'en outre rien ne s'oppose à l'emploi d'un système d'écriture abréviatif, de la sténographie par exemple, la rapidité de la transmission peut être considérable. « Les longs pendules du télégraphe Caselli, dit M. Quet, accomplissent ordinairement quarante oscillations par minute, et les styles tracent quarante hachures espacées de 1/3 de millimètre. En une minute, les hachures extrêmes parcourues par les styles sont donc éloignées l'une de l'autre de 13 millimètres, et, en vingt minutes, de 260 millimètres. Comme on donne aux hachures une longueur de 11 centimètres, il s'ensuit qu'en vingt minutes l'appareil Caselli fournit le *fac-simile* de l'écriture, des portraits ou des dessins qui sont tracés sur une feuille métallisée de 11 centimètres de large sur 26 centimètres de haut. La netteté de la reproduction exige que l'écriture primitive soit très-lisible et en gros caractères. » (*Rapport sur les progrès de l'électricité et du magnétisme.*)

Depuis 1865, la ligne de Paris à Lyon et à Marseille est ouverte au public pour la transmission des dépêches de ce système vraiment merveilleux.

Un employé de la télégraphie française, M. Meyer, a imaginé et construit un télégraphe autographique, dont le principe est différent du pantélégraphe Caselli, mais qui fonctionne aussi avec une régularité et une rapidité remarquables, en reproduisant le *fac-simile* des dépêches expédiées.

Le transmetteur du pantélégraphe Meyer (fig. 363) est un

cylindre métallique autour duquel on enroule la dépêche écrite de la même façon que dans le système Caselli. Ce cylindre reçoit un mouvement uniforme d'un rouage d'horlogerie qui est régularisé par une lame vibrante. Un style métallique porté par un petit chemin de fer se meut lui-même dans le sens des généra-

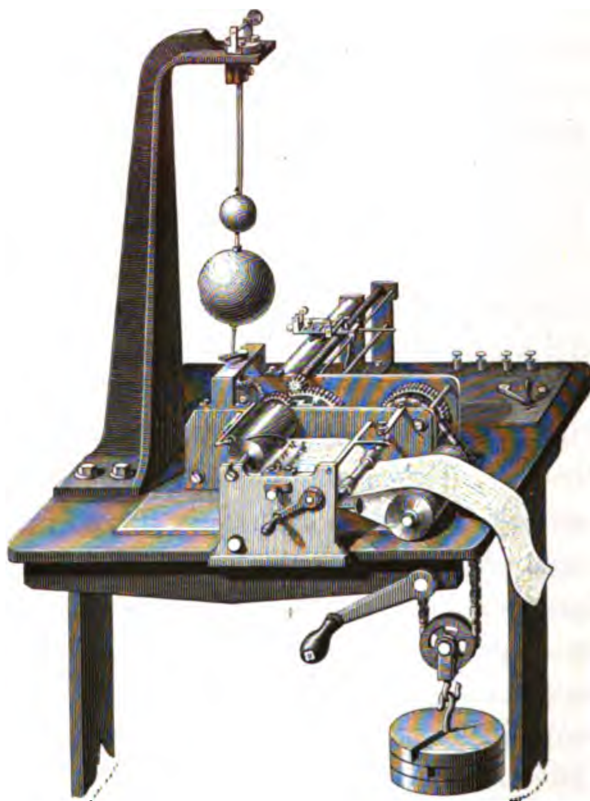


Fig. 363. — Pantélégraphe Meyer.

trices du cylindre, à la surface duquel il décrit, par conséquent, une hélice ou spirale à tours très-rapprochés. Il est relié à la pile et au fil de ligne, et par suite il ferme ou il ouvre le circuit entre les deux stations qui correspondent, selon qu'il rencontre, sur le papier métallisé de la dépêche, des parties conductrices ou des parties isolantes, c'est-à-dire selon qu'il touche la couche d'argent du papier ou les traits à l'encre de la dépêche elle-

même. Jusque-là, sauf la différence entre les genres de mouvements, le principe de la transmission est le même que dans le pantélégraphe décrit plus haut.

L'appareil récepteur se compose d'un cylindre qui est animé d'un mouvement de rotation absolument identique avec celui du cylindre transmetteur. Pendant que l'un fait un tour, l'autre fait aussi, avec la même vitesse uniforme, un tour entier. Or, sur la surface du cylindre récepteur est fixée une hélice saillante qui s'enroule sur toute sa longueur, et dont le pas est précisément égal à la longueur de la circonférence du cylindre transmetteur. Considérons maintenant une feuille de papier disposée parallèlement à la génératrice inférieure du cylindre récepteur, et à une petite distance au-dessous, et supposons que l'appareil fonctionne. Toutes les fois que le courant est lancé dans la ligne, c'est-à-dire quand le style du transmetteur rencontre des parties isolantes ou des traits de la dépêche, le papier est soulevé par le mouvement d'une palette et appliqué contre la pointe de l'hélice saillante qui se trouve en ce moment sur la génératrice inférieure. Pendant le tour entier que décrit simultanément chaque appareil, ce contact s'établit et se rompt autant de fois que le style traceur rencontre des traits de la dépêche ou les abandonne. Or, l'hélice saillante étant constamment imprégnée d'encre grasse par un rouleau, il en résulte, sur une ligne droite occupant la largeur du papier, une série de points ou de traits noirs qui reproduisent identiquement la figure de la ligne rencontrée par le style traceur sur un tour de la dépêche. Comme le papier se déplace sous le cylindre, de façon à avancer à chaque tour d'une quantité égale aux intervalles des tours de spirale du style, on aura, à la fin, sur la feuille du récepteur, une succession de marques dont l'ensemble formera le *fac-simile* de la dépêche.

Comme le télégraphe Caselli, le télégraphe Meyer exige un synchronisme parfait des mouvements des appareils aux stations de départ et d'arrivée. Toute la question est de régler en con-

séquence le mouvement d'horlogerie qui sert de moteur. On voit que si l'appareil Caselli est une combinaison du télégraphe électro-chimique de Bain, avec un mécanisme particulier où le synchronisme est réglé par l'électricité, l'appareil Meyer peut être considéré comme une combinaison du télégraphe Caselli avec certaines parties des systèmes Morse et Hughes.

CHAPITRE V

LES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES

---

§ I — Lignes télégraphiques aériennes — Lignes souterraines

Nous n'avons parlé jusqu'à présent que des appareils qui servent à produire ou à recevoir les signaux. Il nous reste à décrire les fils qui les transmettent, c'est-à-dire qui donnent passage aux courants électriques, principe véritable de la télégraphie.

Une ligne de télégraphie électrique aérienne est constituée par des fils métalliques ordinairement supportés par des poteaux de bois plantés à des distances égales sur le parcours de la ligne. A l'origine, ces fils étaient de cuivre, de 2 millimètres de diamètre. Le métal choisi avait l'avantage d'être fort bon conducteur de l'électricité, mais outre son prix élevé, il avait l'inconvénient de perdre son élasticité sous l'influence des changements de température, et de devenir cassant. Le cuivre, généralement abandonné, a été remplacé par le fer recuit, plus résistant, moins coûteux, et auquel on donne un diamètre de 3 ou 4 millimètres ; sur les lignes un peu longues, où il importe d'avoir la moindre résistance possible au passage des courants,

on emploie du fil de fer de 6 millimètres à 6^{mm},5 de diamètre : c'est en Angleterre que ces gros fils sont employés.

Les fils de fer des lignes télégraphiques sont galvanisés; c'est-à-dire sont, après avoir été décapés dans de l'eau acidulée, recouverts d'une mince couche de zinc : celle-ci s'oxyde à l'air, ce qui préserve le fer de la rouille, et de plus empêche, par une action électrique, l'oxydation des parties qui se trouvent accidentellement mises à nu.



Fig. 364.— Lignes télégraphiques aériennes: poteaux de suspension ; cloches isolantes.

Les poteaux de suspension, de bois de sapin, injectés de sulfate de cuivre, sont isolants quand ils sont secs. Mais pour empêcher la déperdition de l'électricité par les temps humides ou pluvieux, — le fil n'est point directement attaché sur les

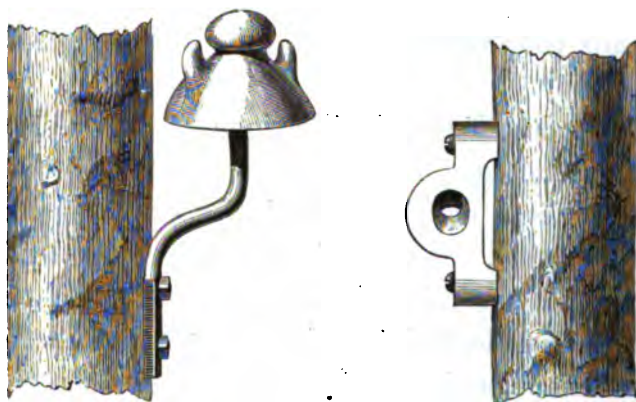


Fig. 365. — Cloches isolantes en champignon; en anneau.

poteaux. Il en est isolé par des cloches de suspension de verre ou de porcelaine. Les figures 364 et 365 montrent comment ces isolateurs sont disposés sur les poteaux, et comment ils main-

tiennent les fils, soit dans les parties droites de la ligne, soit aux points où elle fait des coudes brusques et exige une disposition particulière (supports en anneau) pour éviter les effets de traction.

L'espacement des poteaux est en moyenne de 100 mètres, mais cette distance est ordinairement plus petite dans les courbes, et plus grande au contraire dans les vallées, où les fils peuvent avoir, de poteau en poteau, des portées de 400 à 500 mètres. La hauteur de chaque poteau, de 8 à 10 mètres,



FIG. 366. — Treuils tendeurs des fils télégraphiques.

est plus grande quand la ligne franchit des rivières, des routes, etc. Dans les villes, on fixe les cloches isolatrices de porcelaine sur des consoles de bois appliquées contre les murs des maisons et des édifices, quelquefois sur des potelets dépassant les toitures ; mais, depuis quelques années, on a trouvé préférable de remplacer les fils aériens par des fils souterrains, qu'on établit aussi dans les parties humides du trajet, sous les tunnels, par exemple.

Chaque poteau supporte ordinairement plusieurs fils qu'on fixe à des intervalles de 25 à 30 centimètres, en les alternant de chaque côté en avant et en arrière, de manière à contre-balancer les effets de traction qui tendent à renverser le poteau.

De kilomètre en kilomètre (c'est en France la longueur habituelle de chaque fil), on dispose des *tendeurs*, isolés de la même manière par leur suspension à des cloches de porcelaine : c'est la lame de fer réunissant les deux treuils qui sert alors à joindre électriquement les deux portions du fil (fig. 366). Cette tension des fils est nécessaire pour empêcher les fils multiples de se toucher et de s'entremêler.



Fig. 367. — Tendeur anglais, système Siemens et Halske.



Fig. 368. — Tendeur des lignes allemandes.

En Angleterre et en Allemagne on emploie d'autres procédés de tension des fils, que les figures 367 et 368 permettront de saisir sans plus de détails.

Au début de la télégraphie électrique, on ne s'était pas fié au système de suspension des fils en plein air, qu'on croyait soumis à des causes de déperdition électrique trop fréquentes, et qui d'ailleurs paraissaient exposés à la destruction de la malveillance. En Prusse notamment et en Russie, on enfouissait les fils dans la terre, à une profondeur de 50 à 60 centimètres. Mais ce système de lignes télégraphiques, beaucoup trop dispendieux, a été abandonné à peu près partout ; il est réservé aujourd'hui, comme nous l'avons dit plus haut, aux portions de lignes qui pénètrent à l'intérieur des villes ou qui

ont à traverser les tunnels des voies ferrées. Voici dans ce cas comment sont disposés les divers conducteurs.

Les fils sont de cuivre, recouverts chacun d'une couche de gutta-percha et réunis en un câble qu'on entoure lui-même de filin goudronné. Ce câble est alors placé à l'intérieur d'un tube de fonte, de bois créosoté ou de plomb, qu'on enfouit à une profondeur maximum d'un mètre, sur un lit de sable ou de terre tamisée. Telle est la ligne souterraine qui relie, à Paris, l'Administration centrale des télégraphes à l'Observatoire, au Luxembourg, aux gares de Montparnasse et des chemins de fer de Lyon et d'Orléans. Elle n'a donné des résultats qu'à demi satisfaisants, et plusieurs fois les fils ont subi des déperditions assez fortes pour les mettre hors de service.

Un autre système consiste à employer des fils de fer galvanisés semblables à ceux des lignes aériennes, réunis en blocs de quatre, six et dix fils, isolés les uns des autres par des masses de bitume. Le câble ainsi formé est noyé dans une masse de bitume coulée au fond d'une tranchée d'un peu plus d'un mètre de profondeur. Telles sont, à Paris, la ligne qui relie l'Administration des télégraphes aux Tuileries, au Louvre, à l'Hôtel de Ville, à la Bourse, à la Préfecture de police et qui ne fonctionne plus qu'en partie ; puis une ligne de 1200 mètres de longueur établie à Bordeaux. Ce procédé a donné d'excellents résultats, mais les tranchées doivent être mises à l'abri des infiltrations du gaz, qui, à la longue, altéreraient le bitume.

Dans les tunnels, on disposait aussi les fils contre la voûte, mais en les protégeant contre l'humidité par une couche de gutta-percha qui les réunit en un seul câble ; mais on a reconnu que l'enveloppe isolante s'altère assez rapidement sous l'action des agents atmosphériques.

§ II — Lignes télégraphiques sous-marines — Cables transocéaniques

La transmission des courants électriques et des signaux constituant la télégraphie électrique, transmission qui se fait, comme on vient de le voir, dans l'air et au sein de la terre à l'aide de fils métalliques convenablement isolés, est-elle possible dans l'eau ?

Cette question intéressante a été résolue dès le début. En 1839, en effet, M. O'Shaughnessy reliait télégraphiquement les deux rives de l'Hougly, dans l'Inde, à l'aide d'un fil métallique isolé et plongé dans les eaux du fleuve. L'année suivante, M. Wheatstone, dont on retrouve le nom à chaque phase progressive de la télégraphie électrique, proposait de relier Douvres et Calais par un câble. Ce projet ne fut réalisé qu'en 1850 : l'ingénieur français Brett posa, à cette dernière date, un fil de cuivre isolé par une enveloppe de gutta-percha, entre le cap Gris-Nez et Douvres. Le câble fut rompu[1], mais la possibilité de la communication télégraphique sous-marine était démontrée, et un nouveau câble fut définitivement établi en 1851 à travers le détroit. Il fallut quinze ans encore d'essais, de tentatives plus ou moins heureuses pour résoudre le problème dans toute sa généralité. Mais alors la réussite de la pose et du fonctionnement de l'immense câble transatlantique qui relie l'Europe à l'Amérique, entre l'Irlande et Terre-Neuve, fut le point de départ d'un développement prodigieux du réseau télégraphique universel. A cette heure, le globe terrestre est sillonné, non-seulement à travers les continents, mais dans les profondeurs de la mer, de fils qui portent

1. « Quelques dépêches (environ 400) passèrent; mais, subitement, le fil resta muet. Un pêcheur l'avait relevé dans ses filets, et s'était empressé d'en couper un morceau qu'il apporta triomphalement à Boulogne pour montrer cette singulière production marine à centre d'or. » (W. Huber, *le Réseau télégraphique du globe*.)

partout, avec la rapidité de la foudre, les dépêches privées et publiques de toutes les nations civilisées.

Entrons dans quelques détails sur les lignes sous-marines, sur la structure des câbles qui contiennent les fils et sur le mode d'immersion adopté.

Le fil conducteur d'un câble sous-marin est recouvert de plusieurs enveloppes qui ont pour objet, soit de l'isoler, soit de le protéger contre les chances de destruction. C'est, soit un fil, de

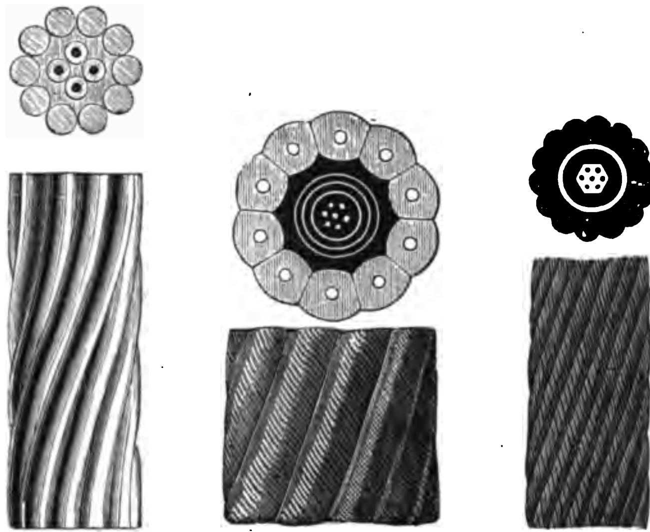
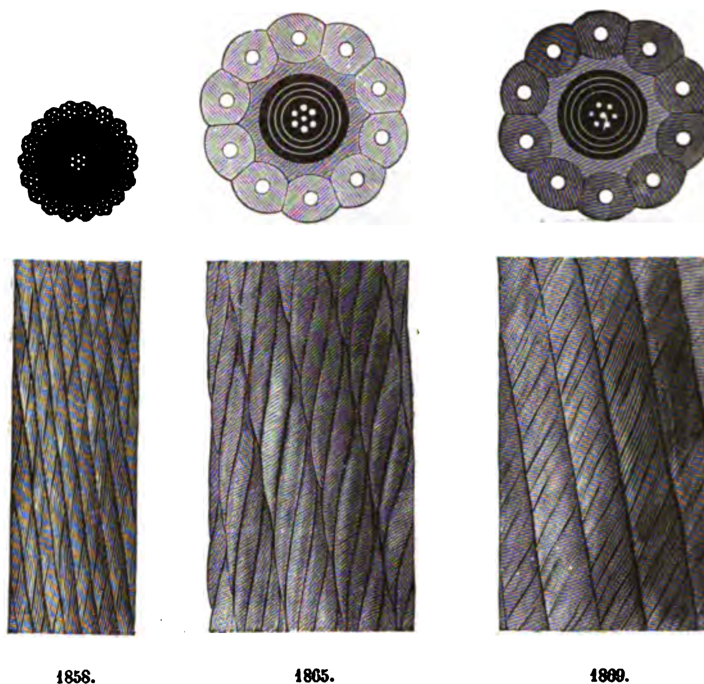


FIG. 369. — Câbles sous-marins : vue extérieure et coupe.

cuivre de 1 ou 2 millimètres de diamètre, soit une corde formée de cinq ou six fils très-fins tordus en hélice : cette dernière disposition est préférée aujourd'hui, parce qu'en cas d'accident et de rupture des fils intérieurs, il suffit qu'un ou deux de ces fils résistent, pour que les communications ne soient pas interrompues.

Ce qui est très-important, c'est que les fils soient noyés dans une enveloppe de gutta-percha; on met ordinairement quatre couches de cette substance, d'une épaisseur totale de 3 à 4 millimètres. La gutta-percha est non-seulement un très-bon isolateur, mais elle est à peu près inaltérable dans

l'eau de mer. A l'origine, on se bornait à cette enveloppe, mais on eut bientôt reconnu la nécessité de la protéger extérieurement contre les avaries. Tout autour on met donc une couche épaisse de filin goudronné, et enfin, extérieurement, cette couche se trouve maintenue et protégée par une série de fils de fer galvanisés enroulés en hélice. Nous reproduisons ici, en vraie grandeur, quelques-uns des câbles fonctionnant



1858. 1865. 1869.

FIG. 370. — Câbles transatlantiques de la ligne de Valentia à Terre-Neuve : grandeur naturelle.

aujourd'hui sur diverses lignes télégraphiques sous-marines. On peut voir que ces échantillons diffèrent de grosseur, mais la fabrication est à peu près identique : toutefois, dans les anciens câbles, on avait cru pouvoir loger plusieurs fils distincts (fig. 369), afin de multiplier les communications. On a renoncé généralement à cette méthode, parce qu'on a reconnu les inconvénients des fils multiples ; ils nécessitent, en effet, un volume et un poids considérable, qui rendent difficile l'opération de la pose ;

mais surtout le voisinage des fils détermine la production de courants induits qui entravent la transmission. On préfère donc, si l'activité des correspondances l'exige, établir entre les stations extrêmes plusieurs câbles; d'autant plus que tout accident grave arrivé à l'un d'eux laisse généralement les autres disponibles.

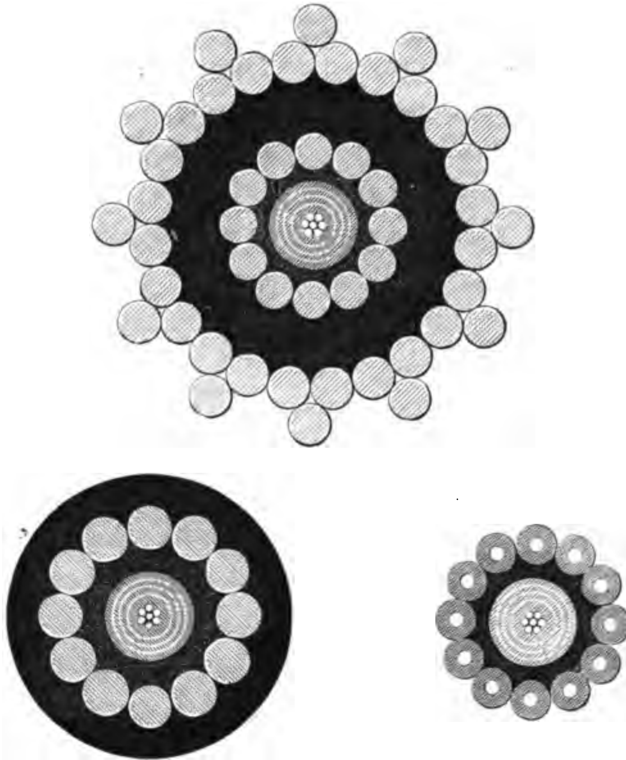


FIG. 371. — Câble transatlantique de la ligne de Brest à Saint-Pierre, posé en 1867 : coupe de grandeur naturelle.

Sur une même ligne, le câble diffère ordinairement de grosseur, selon la portion du parcours qu'il traverse. Tout près des côtes, là où la mer est peu profonde, où le câble est exposé aux accidents provenant de l'agitation de la mer pendant les gros temps, de la rencontre des ancres des navires et des filets des pêcheurs, la grosseur du câble est maximum; l'enveloppe métallique est formée de fils d'un gros diamètre qu'on revêt d'un composé siliceux, ayant pour objet d'accroître la résistance

à l'usure venant du frottement contre les rochers. C'est le *câble d'atterrissage*. Pour les profondeurs moyennes, on adopte un diamètre moindre, et pour l'ensemble du câble et pour les fils de l'enveloppe métallique. Enfin, pour la portion destinée à être submergée en pleine mer, dans les eaux les plus profondes, on adopte le minimum de grosseur (fig. 371), le câble n'ayant plus à redouter les agitations de la surface, et sa pose étant grandement facilitée par la diminution de son poids.

Ce poids est en effet quelque chose d'énorme pour les lignes sous-marines tant soit peu longues. Le câble de Douvres à Calais, posé en 1851, qui n'avait que 41 kilomètres de longueur, pesait toutefois plus de 180 000 kilogrammes. Les câbles transatlantiques reliant Valentia et Brest à l'Amérique pesaient, le premier, 865 kilogrammes par kilomètre, le second 836. Cela fait pour le poids total, 4300 tonnes pour le premier, et près de 4000 tonnes pour le second, en n'y comprenant que la section comprise entre Brest et l'île Saint-Pierre. Un seul navire, le colosse des mers, le *Great-Eastern*, était capable de se charger d'une charge pareille. Mais l'inconvénient d'un tel poids, qui diminue, il est vrai, pour la partie immergée du câble, est surtout grave, quand la pose se fait dans les grandes profondeurs, quand la portion en suspension se déroule à une profondeur de 2500 brasses ($4^{\text{kilom.}}$,06). Mais nous n'avons point à décrire ici les péripéties de la pose d'un câble sous-marin qui franchit un aussi grand parcours. Revenons au côté physique de la question.

Avant la réussite, bien des personnes doutaient de la possibilité de transmettre des signaux sous-marins à de grandes distances, par exemple du continent européen au continent américain, à travers l'Atlantique. Ce n'était pas tant la distance même que cet inconnu d'un câble immergé à des profondeurs énormes, plongé dans un élément éminemment conducteur, l'eau de mer, qui les effrayait. Comment ce fil se comporterait-il quand les courants électriques y seraient lancés? Son isolement serait-il suffisant? La force du courant serait-elle suffisante

pour parvenir, sans perturbation d'un bout à l'autre de l'immense ligne sans relais? Ces craintes, qui étaient d'abord formulées assez vaguement, parurent un instant justifiées quand, en août 1859, après quelques dépêches échangées entre les États-Unis et l'Irlande, on vit les appareils peu à peu ne plus donner que des signaux confus, et finalement cesser de fonctionner. La cause de l'interruption resta d'abord ignorée.

Il fallut donc reprendre à nouveau, ou mieux commencer sérieusement l'étude expérimentale et théorique de la transmission des courants dans un fil isolé et submergé, de manière à se rendre compte des obstacles et à les vaincre par des moyens efficaces. Plusieurs savants français et étrangers — citons MM. Faraday, Wheatstone, Guillemin, Gaugain, Siemens — se mirent à l'œuvre, et tous contribuèrent à la solution de cette question importante.

Il fut reconnu qu'un câble immergé dans l'eau de mer se transforme, quand un courant électrique le parcourt, en un condensateur analogue à la bouteille de Leyde : la charge électrique du fil de ligne intérieur agit sur les conducteurs extérieurs, armature métallique et eau de la mer, à travers l'enveloppe isolante, composée, comme on l'a vu, de gutta-percha. Les courants induits qui naissent ainsi sous l'influence du courant lancé dans la ligne par les appareils, persistent, après la rupture, pendant un certain temps, de sorte que l'envoi d'un courant nouveau n'est possible qu'après ce temps; sans quoi les choses se passeraient comme si la ligne était parcourue par un flux continu d'électricité : les signaux deviendraient impossibles. Il est également prouvé que la conductibilité de la gutta-percha n'est pas nulle, et que le courant s'affaiblit par une déperdition qui se fait au travers de l'enveloppe isolante.

Une fois les causes reconnues, il devint possible d'en combattre les effets. Aux électromoteurs voltaïques, à la pile, on a d'abord substitué des appareils d'induction magnéto-électrique, produisant des courants d'une plus grande intensité, et qui se propagent avec une rapidité plus grande que les courants

ordinaires. De plus, pour neutraliser les courants induits, on a imaginé des procédés divers : l'un, dû à M. Whitehouse, consiste à lancer dans le câble, alternativement, des courants de sens contraires; les courants induits qui en résultent sont eux-mêmes de sens contraires, de sorte qu'ils se détruisent ou se neutralisent. M. Varley a interposé, entre le manipulateur et la ligne, un condensateur à très-large surface (de 40 000 pieds carrés anglais). Voici, d'après M. Du Montcel, comment agit ce condensateur pour neutraliser les courants induits : « Au moment du contact du manipulateur (c'est un simple inverseur de courant à touches), un flux électrique est envoyé à travers le câble pour agir sur le récepteur, et ce flux est positif ou négatif, suivant celle des deux touches du manipulateur qui est abaissée. Mais, aussitôt que cette touche s'est relevée, une communication se trouve établie entre le condensateur et la terre, et l'électricité condensée peut s'écouler en terre des deux côtés de la ligne. Il arrive alors que la charge de nom contraire à celle qui a fourni le premier flux d'électricité qui agit sur le récepteur, rencontre celle-ci à travers le câble et la neutralise instantanément, en détruisant à la fois l'effet d'induction produit par elle dans l'enveloppe du câble. De cette manière, le câble se trouve remis, instantanément pour ainsi dire, à l'état neutre, et devient susceptible de fournir immédiatement un nouveau signal. »

Voici, du reste, quel est le système adopté dans la grande ligne transatlantique de Brest à Saint-Pierre. L'appareil télégraphique est un télégraphe à aiguille : la raison de ce choix tient à l'extrême sensibilité des galvanomètres, dont les aiguilles peuvent osciller sous l'action de courants peu intenses. Néanmoins, pour accroître encore cette sensibilité, et permettre aux employés du poste récepteur de lire les signaux sans hésitation, M. Varley a modifié de la façon suivante les galvanomètres de Thompson. « Dans cet appareil, dit M. Du Montcel, l'organe sensible est un petit miroir lenticulaire dirigé magnétiquement par une petite aiguille aimantée, et celle-ci est rap-

pelée dans une position fixe par un aimant. Un rayon lumineux est projeté sur ce petit miroir et renvoyé par lui sur un écran placé à une distance de huit pieds. Avec cette amplification, le moindre mouvement, imperceptible à l'œil nu, se trouve accusé par le déplacement de l'image projetée, et les positions que cette image occupe successivement, à gauche ou à droite d'une ligne de repère fixe, peuvent indiquer les points et les traits de l'alphabet Morse. On obtient ainsi toutes les combinaisons nécessaires à l'interprétation des dépêches, qui se lisent sur un écran dans une chambre noire. »

Les figures 372 et 373 représentent l'appareil télégraphique du câble transatlantique français, tel qu'il est installé à la station de Brest. La première est une coupe du galvanomètre de Thompson; la seconde montre la disposition d'ensemble de l'appareil. Au centre de la bobine, on voit le petit miroir circulaire qui porte l'aiguille aimantée rendue astatique par un aimant E suspendu à une tige verticale surmontant le galvanomètre. Un fil de cocon supporte le miroir, dont les mouvements se trouvent ralentis par une palette suspendue elle-même audessous du système. C est le commutateur de l'appareil; B, le manipulateur à double touche, analogue au manipulateur Morse, lançant alternativement des courants positifs et négatifs : aux courants négatifs correspondent les déviations à gauche de l'aiguille et du miroir; les courants positifs font au contraire dévier l'aiguille à droite. F est une chambre obscure renfermant l'échelle sur laquelle viennent se former les images de la flamme de la lampe située par derrière. Le faisceau lumineux traverse un trou pratiqué dans la paroi de la chambre, suit la route R, tombe sur le miroir, et se reflète, par R′, au zéro de la division quand le miroir est immobile. A chaque passage du courant transmis par le câble, le miroir oscille à

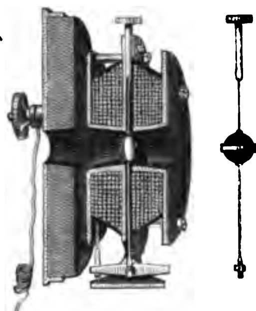


Fig. 372. — Coupe du galvanomètre Thompson dans l'appareil télégraphique du câble transatlantique de Brest.

droite ou à gauche, comme on vient de le voir, et l'image oscille horizontalement de part ou d'autre du zéro. En A, est la pile formée de 20 éléments Daniell; en J, se fait la communication du fil avec la terre.

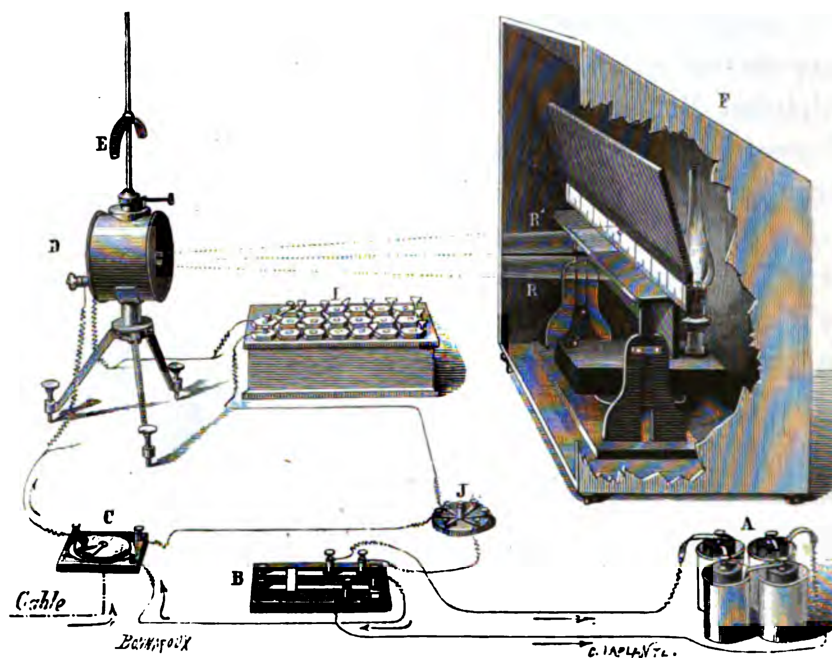


FIG. 373. — Télégraphe transatlantique de Brest à Saint-Pierre : vue d'ensemble de l'appareil.

L'employé du poste, dès qu'il a reçu l'avis qu'une dépêche est transmise, met son commutateur à la réception; puis il fixe les yeux sur l'échelle divisée de la chambre obscure, notant tous les signaux indiqués par les oscillations successives de l'image lumineuse, signaux qui correspondent, nous l'avons dit, au vocabulaire conventionnel du système Morse. Il n'y a plus ensuite qu'à traduire la dépêche et à l'écrire en caractères ordinaires.

§ III — Les Piles employées en télégraphie

Les divers systèmes de télégraphes que nous avons décrits, comme ceux que nous n'avons fait que mentionner, peuvent se diviser, sous le rapport de la source électromotrice, en deux classes : la première comprenant les appareils qui fonctionnent à l'aide d'une pile à courant constant, et la seconde ceux dont le principe est emprunté aux machines d'induction magnéto-électrique.

Nous avons consacré aux piles un chapitre entier des *Phénomènes de la physique*. Il est bon, toutefois, de revenir sur ce sujet au point de vue exclusif de l'application de la pile à la télégraphie.

Les anciennes piles de Bunsen et de Daniell ont été les premières usitées, et la seconde est encore généralement employée en France, tandis que la pile de Bunsen ne l'est plus guère que sur quelques lignes américaines. En Angleterre, le service de la télégraphie électrique se fait au moyen de piles à auges, dont les compartiments renferment du sable imprégné d'une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque ou d'eau acidulée : une plaque de zinc amalgamée et une de cuivre sont plongées dans chaque compartiment. Cette pile fournit un courant de peu d'intensité, mais qui peut convenir de préférence aux systèmes télégraphiques à aiguille.

La pile de Daniell est d'un entretien facile. Il suffit de verser de temps à autre du liquide pour réparer les pertes qui se font par évaporation, soit dans le vase renfermant l'eau acidulée, soit dans le vase poreux contenant la dissolution de sulfate de cuivre ; puis de veiller à ce que les cristaux de sulfate qui reposent sur le diaphragme soient toujours en suffisante quantité. Enfin, il faut enlever de temps à autre les efflorescences cristallines qui se déposent sur les parois, et remplacer les

lames de zinc quand l'amalgamation est altérée. La constance du courant de cette pile, qui a pu fonctionner pendant près de trois mois, sans entretien, sur une ligne aussi fréquentée et aussi longue que celle de Paris à Berlin, en fait un bon électromoteur. Le nombre des éléments Daniell employés pour des distances de 100, 200, 400 kilomètres, est de 30, 50 et 70.

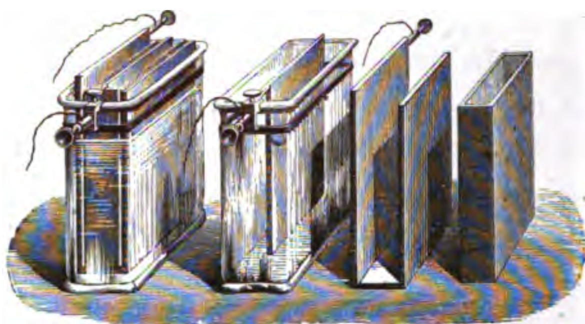


Fig. 374. — Pile de Daniell employée dans la télégraphie.

On emploie également, en France, la pile de Marié Davy à sulfate de mercure. La disposition primitive de cet élément (fig. 375) a été remplacée par une forme analogue à celle du

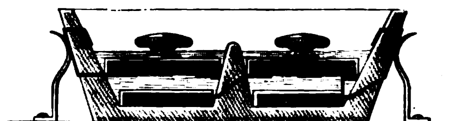


Fig. 375. — Pile de Marié Davy à sulfate de mercure.

couple de Daniell, avec cylindre de charbon au lieu de lame de cuivre. Une pile de 38 éléments Marié Davy, fonctionnant nuit et jour sur une ligne de 500 kilomètres, a fourni un courant d'une constance suffisante pendant un intervalle de temps de près de quatre mois.

Le nombre des appareils électromoteurs inventés à l'étranger et en France, pour le service de la télégraphie électrique, est si considérable, que la place nous manquerait pour les énu-

mérer, à plus forte raison pour les décrire. Beaucoup, dans le nombre, sont remarquables par telle ou telle qualité particulière et ont été expérimentés avec succès. Il est d'ailleurs aisé de concevoir que le succès de cet emploi dépend des appareils télégraphiques auxquels la pile est destinée, et qui exigent des forces électromotrices plus ou moins grandes.

Disons, pour terminer, qu'il y a lieu de distinguer entre les piles de ligne, qui lancent des courants à grandes distances, et les piles locales, qui ont seulement pour objet le service des appareils du poste : ces dernières, dont le circuit est très-court et qui n'ont pas à fournir d'électricité à la ligne, sont formées d'un petit nombre d'éléments, dont la force électromotrice totale est naturellement très-inférieure à celle des piles de ligne.

§ IV — Les Sonneries

Parlons maintenant des sonneries, dont nous avons indiqué le rôle en décrivant les appareils télégraphiques, sans entrer dans aucun détail sur le mécanisme qui les met en activité. Les systèmes de sonneries sont au moins aussi nombreux que ceux des appareils eux-mêmes. Bornons-nous à faire comprendre un ou deux de ces systèmes.

Le plus simple et le plus généralement adopté dans les lignes télégraphiques françaises, est celui dont la figure 376 donne une vue intérieure. Un électro-aimant reçoit dans sa bobine le courant envoyé à la borne A, et de là, par le manche du marteau BM en contact avec un ressort R, il sort par le bouton *b* et la borne D qui communique avec les piles, et le circuit se trouve alors fermé. La tige du marteau qui joue le rôle d'armature est attirée par l'électro-aimant, et le marteau vient frapper le timbre. Mais le contact avec le ressort a par là même cessé : le courant est interrompu, la tige du marteau retombe sur le ressort, ce qui donne naissance à un nouveau courant, et ainsi

de suite, tant que le circuit passe par l'appareil de sonnerie, c'est-à-dire, comme nous l'avons vu en décrivant le télégraphe à cadran de Bréguet, tant que le commutateur est sur le bouton correspondant.

Il résulte donc de là une série de chocs répétés, très-rapprochés les uns des autres, d'où le nom de *sonnerie trembleuse* donné à l'appareil. Le principe du mécanisme est dû à Neef, et c'est un électricien belge, M. Lippens, qui l'a appliqué le premier aux sonneries.

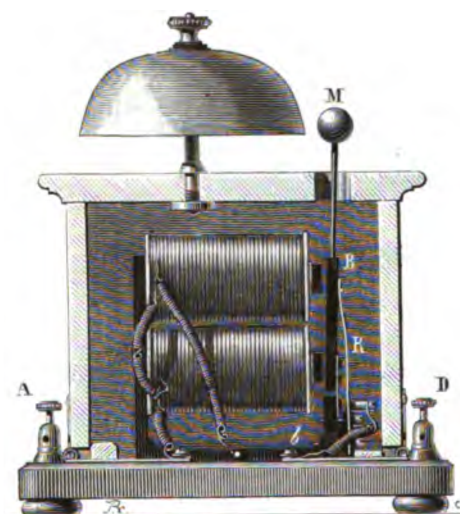


FIG. 376. — Sonnerie trembleuse de Bréguet.



FIG. 377. — Sonnerie trembleuse à déclancheur, système Aubine.

Quand on veut obtenir des sonneries prolongées et plus intenses, on adapte au système de sonnerie trembleuse décrit plus haut un mécanisme déclancheur qui introduit dans l'appareil le circuit d'une pile locale. Telle est la sonnerie de M. Aubine (fig. 377). Un levier coudé est retenu contre le manche du marteau par une dent latérale. Quand la sonnerie est mise en action par le courant de ligne, le marteau, attiré par l'électro-aimant, dégage le levier, qui tombe alors sur le ressort r', en abandonnant le ressort r. Il est aisé de voir alors que le courant de la ligne est rompu, tandis que celui de

la pile locale PN est fermé. La sonnerie se trouve ainsi mise en activité par un courant plus énergique, qui dure tant que l'employé averti n'a pas remis en place le levier déclancheur, ce qui se fait au moyen d'un bouton extérieur qui termine le levier, et qu'on voit à la partie supérieure de la boîte.

Les sonneries électriques ont reçu, dans les mines, une application d'un haut intérêt pour la vie des mineurs. La seule présence du grisou, quand sa proportion dans l'air d'une mine est assez grande pour devenir dangereuse, peut être indiquée automatiquement à l'aide d'un appareil dont la communication électrique est établie avec une pile et une sonnerie. Voici sur quel principe cet appareil, imaginé par M. Ansell, est basé.

On sait que si deux gaz de densités inégales sont séparés par une membrane poreuse, chacun d'eux traversera la membrane avec une vitesse qui lui est propre. Au bout d'un certain temps, il y aura mélange; mais comme le gaz le moins dense traverse la cloison poreuse en plus grande abondance que l'autre, il en résultera, pour le milieu occupé par ce dernier, une augmentation de pression. Voyons comment ce phénomène est utilisé dans l'*indicateur du grisou* (fig. 378).

Un tube recourbé a l'une de ses branches terminée en entonnoir, ou sous la forme d'un vase fermé par une plaque *m* de substance poreuse. Le tube contient du mercure, dont le niveau est le même pour chaque branche dans les circonstances ordinaires, c'est-à-dire quand l'air de la galerie est pur. Mais si l'hydrogène carboné vient à se dégager autour de l'appareil, le gaz explosif, pénétrant par la plaque poreuse, augmentera la pression dans cette branche du tube et refoulera le mercure dans l'autre branche. Le mercure, en s'élevant de la sorte, met en contact, par l'intermédiaire d'une tige métal lique *f*, les deux électrodes, positive et négative *a*, *b*, d'une pile. Le courant passe, met en branle une sonnerie ou envoie un signal télégraphique quelconque, soit à l'intérieur, soit au dehors de la mine.

Le même appareil peut servir à signaler la présence d'un gaz plus dense que l'air, comme l'acide carbonique, l'acide sulfhydrique. Il suffit alors d'établir le contact dans la partie du tube qui est située au-dessous de la plaque poreuse.



Fig. 378. — Indicateur du grisou de M. Ansell.

L'indicateur du grisou de M. Ansell a été expérimenté avec succès dans diverses mines en Angleterre et en France.

§ V — Les Parafoudres

La supériorité de la télégraphie électrique sur la télégraphie aérienne résulte principalement de la rapidité avec laquelle les dépêches publiques et privées peuvent être transmises, quelle que soit, pour ainsi dire, la distance des stations extrêmes : quelques secondes, quelques minutes au plus suffisent à l'agent docile pour franchir des milliers de kilomètres. Mais ce n'est pas là la seule raison qui a fait rejeter, comme suranné, un mode de correspondance qui paraissait, il y a quarante ans tout au plus, une merveille de célérité : il faut y joindre la constance, la continuité presque absolue du fonctionnement des appareils, à la seule condition d'entretenir avec soin le bon état des piles, de la ligne et des mécanismes

transmetteur et récepteur. Le télégraphe optique de Chappe ne marchait que le jour, et encore par les temps clairs; que de fois une dépêche importante n'arrivait qu'en partie à destination, portant cette mention : *Interrompue par la brume*..... ou *par la nuit!*

Rien de semblable n'est à craindre pour le télégraphe électrique, qui peut fonctionner l'année entière, le jour et la nuit. Faisons une réserve toutefois : la transmission des courants électriques est parfois entravée. Pendant les orages, les fils de ligne sont partiellement électrisés; de là des perturbations dans les dépêches qui viennent de points éloignés du phénomène accidentel. Les aurores boréales produisent des effets analogues et des irrégularités auxquelles on n'a pas encore opposé de moyens certains.

Ces perturbations peuvent être assez fortes pour causer des dégâts, soit sur la ligne, soit dans les postes et les appareils. Dans les orages d'une certaine violence, la foudre peut briser les poteaux, les supports de porcelaine; les aimants, les aiguilles des boussoles, peuvent être désaimantés, ce qui n'étonnera point le lecteur, s'il veut bien se reporter aux phénomènes électro-magnétiques que nous avons décrits dans notre ouvrage : LES PHÉNOMÈNES DE LA PHYSIQUE. Au contraire, les armatures ou les barreaux de fer doux des électro-aimants peuvent recevoir, dans ces circonstances, une aimantation permanente qui les mette hors de service.

A cela il n'y a d'autre remède que la surveillance de la ligne et des appareils de poste, la vérification répétée de leur bon fonctionnement, surtout dans les saisons des orages, ou dans le cas où des aurores auraient fait leur apparition. En cas d'avarie, il faut remplacer les objets brisés ou détériorés; mais, comme tout cela est aujourd'hui prévu, les lignes bien organisées possèdent, en tous leurs postes importants, les pièces de rechange indispensables; et, en somme, l'interruption ne dure relativement que peu de temps.

Il y a toutefois un danger qu'on peut prévenir et qu'on

est parvenu à prévenir efficacement : c'est celui qui menace les employés des postes, leur sécurité et leur vie. Il est arrivé, à l'origine de la télégraphie électrique, que de fortes étincelles ont éclaté entre des objets métalliques : la décharge brisait les pièces, les projetait au loin, et blessait ou tuait les personnes qui se trouvaient sur le passage du fluide. Chaque poste a été depuis lors muni de petits appareils fort simples,

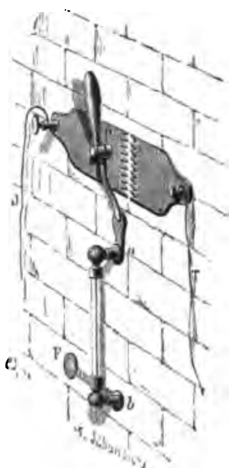


FIG. 379. — Parafoudre Bréguet.

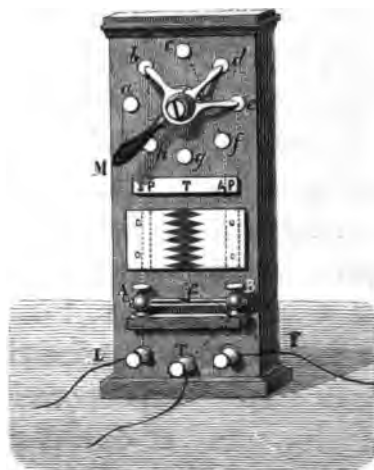


FIG. 380. — Parafoudre des lignes télégraphiques françaises.

ayant pour objet de faire écouler l'électricité orageuse dans le sol, et d'épargner à la fois les instruments télégraphiques et les employés. Ces *paratonnerres* ou *parafoudres* sont variés de principes et de formes. Décrivons quelques-uns des plus usités.

Le parafoudre Bréguet, que représente la figure 379, est d'une grande simplicité. Il consiste essentiellement en deux plaques métalliques dentelées, dont les dents sont en regard les unes des autres; en un tube qui renferme un fil de fer très-fin reliant électriquement les bornes *a* et *b*, et enfin en un commutateur P. Quand la touche de ce dernier occupe la position indiquée par la figure, le courant de la ligne passe de L en F, et de là dans les appareils du poste. L'électricité dyna-

mique provenant de la pile n'a pas une tension assez forte pour s'écouler par les pointes des plaques, elle continue son trajet ordinaire; mais l'électricité atmosphérique, au contraire, s'écoule par les pointes, et de là, par le fil T, dans la terre.

En cas d'orage un peu violent, cette voie d'écoulement peut devenir insuffisante, et dans ce cas l'électricité passe par le fil, qu'elle rougit et même peut fondre. Mais dans ce dernier cas, l'interruption avec le poste résulte de la fusion même du fil, et l'électricité orageuse s'écoule dans la terre. Si l'orage a été prévu, l'employé porte la touche du commutateur sur la borne du fil de terre, et toute communication est interrompue avec le poste.

La figure 380 représente une autre disposition du parafoudre également basée sur le pouvoir des pointes et sur la manière différente dont se comporte l'électricité, selon qu'elle émane des courants voltaïques ou qu'elle est due à une perturbation atmosphérique. Le commutateur est pourvu de trois touches. Quand celle du milieu est sur le bouton *d*, comme l'indique la figure, le courant de la ligne va directement dans le poste, ainsi qu'il est aisé de s'en rendre compte en suivant les lignes pointillées qui marquent la liaison électrique des diverses parties de l'appareil. De la borne L du fil de ligne, le courant va dans le commutateur, et de là dans la borne F du poste; il ne passe point par le fil *f*. En cas d'orage, on pose la touche du milieu sur le bouton *b*, et alors le courant traverse les plaques à pointes et le fil avant d'arriver au poste. Enfin, si l'orage est violent, on pose le commutateur vis-à-vis de la lettre T (*terre*), sa touche médiane sur le bouton *c*. Tous les courants électriques s'écoulent directement dans le sol, sans avoir aucune communication avec les appareils télégraphiques du poste, mis ainsi à l'abri de tout danger.

Le parafoudre Bianchi est aussi fondé sur les pouvoirs des pointes; en cas d'électricité orageuse fournie par la ligne, cette électricité s'écoule par les pointes rangées dans une boule de verre tout autour d'une sphère métallique qui, par un anneau

également métallique, est en communication permanente avec le sol. En faisant le vide dans la boule de verre, l'écoulement est plus prompt, mais cette précaution n'est pas absolument nécessaire.

Les parafoudres que représentent les figures 381 et 382 ne sont plus basés sur le pouvoir des pointes métalliques, mais seulement sur l'inégalité de tension de l'électricité dynamique ou des courants réguliers de la ligne et de l'électricité atmosphérique ou orageuse. Tandis que la première est arrêtée par

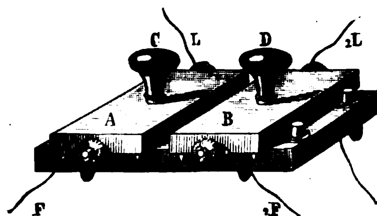


FIG. 381. — Parafoudre du système Siemens et Halske.



FIG. 382. — Parafoudre des lignes télégraphiques belges.

une feuille isolante et pénètre dans les appareils, l'autre s'écoule à travers le conducteur plus large, qui est offert à sa propagation, malgré l'interposition du corps isolant. Elle peut donc ainsi se perdre dans le sol, sans causer dans le poste aucune perturbation ni aucun dégât.

Le parafoudre de Siemens et Halske (fig. 381) se compose d'une plaque de fonte qui communique avec la terre; au-dessus, aussi près que possible, mais sans qu'il y ait de contact métallique, reposent deux plaques plus petites A, B, reliées d'une part aux fils de ligne L, L_2, d'autre part aux appareils F, F_2. Les courants voltaïques n'ont pas assez d'intensité pour vaincre la résistance qui résulte de la distance des conducteurs et de la plaque de terre; mais, en cas d'orage, l'électricité atmosphé-

rique suit au contraire cette dernière voie, et les appareils se trouvent préservés.

Le parafoudre adopté sur les lignes belges (fig. 382) consiste aussi en plaques métalliques *pp*, *df*, séparées par une feuille isolante de papier mince. Les fils de ligne des deux postes voisins de gauche et de droite aboutissent en L et L′, et ceux des appareils du poste en F et F′; T communique avec le bouton *b* et avec la terre. Quatre trous, 1, 2, 3, 4, pratiqués dans le socle de bois qui porte les plaques, sont destinés à recevoir une cheville métallique *c*, qui met alors en communication les diverses pièces du parafoudre. En temps normal, la cheville reste en place dans la position marquée par la figure : alors les postes voisins communiquent avec les appareils du bureau télégraphique; la correspondance est libre des deux côtés. Un orage est-il annoncé à droite, on place la cheville sur le trou 2; l'électricité atmosphérique se perd dans le sol par la plaque et le fil T. Si la perturbation se fait sentir à gauche, la cheville est placée dans le trou 1. Enfin on la place au trou 4, dans le cas où l'orage menacerait à la fois les deux lignes. Le trou 3 sert à établir la communication directe entre les deux lignes, de sorte que l'appareil sert à la fois de parafoudre et de commutateur.

§ VI — Le Réseau télégraphique universel

Il est inutile, croyons-nous, de faire ressortir l'importance de la télégraphie électrique au point de vue des relations privées, publiques et internationales. Cette application d'une des branches de la physique qui ont fait le plus de progrès depuis un siècle, est une conquête si éclatante du génie humain sur le temps et les distances, que personne ne saurait en méconnaître l'immense portée. Restreinte, à l'origine, aux correspondances publiques ou gouvernementales, aux dépêches de la diplomatie, elle a pris tout son développement, depuis qu'on a senti la

nécessité de la mettre au service des intérêts privés. L'usage du télégraphe s'est depuis lors prodigieusement étendu, et s'accroît tous les jours encore, à mesure qu'augmente le nombre des stations ouvertes à la circulation : c'est ainsi, pour ne parler que de la France, qu'il y a vingt ans, dix-sept bureaux télégraphiques envoyaient à peine annuellement 9000 dépêches, tandis qu'aujourd'hui 3500 bureaux en expédient plus de 6 millions.

La dépêche télégraphique ne sert pas seulement aux relations de famille ou d'amis, mais encore et surtout aux relations d'affaires, au commerce, à l'industrie, aux spéculations de bourse. Voilà pour les intérêts privés. La diplomatie, la guerre, les travaux publics, l'administration, la politique, la police, en font un usage continu. Dans un domaine plus élevé et plus serein, celui de la science, elle rend les services les plus grands, en fournissant aux astronomes le moyen de déterminer avec précision la longitude, en signalant à tous les observatoires les découvertes des astres nouveaux, comètes ou planètes, et en faisant ainsi gagner des semaines à la vérification, à l'enregistrement des découvertes. En météorologie, le service télégraphique annonce les perturbations prochaines du temps, les crues des cours d'eau, prévient les ports des bourrasques, et dote ainsi la navigation d'avertissements précieux qui ont déjà fait épargner bien des sinistres aux navires et à leurs équipages.

Cette énumération des services rendus par la télégraphie est bien incomplète. Mais le meilleur moyen d'en démontrer toute l'importance, c'est de transcrire ici quelques chiffres indiquant l'état actuel du réseau de lignes aériennes et de lignes sous-marines qui fonctionne aujourd'hui sur la terre entière.

Le développement des fils, sur le globe terrestre, n'atteint pas moins de 2 millions de kilomètres : c'est, comme on voit, cinquante fois la longueur de la circonférence de la Terre. Sur ce chiffre total, la télégraphie sous-marine compte pour 80 000 kilomètres répartis entre 231 câbles, de longueurs d'ailleurs fort inégales.

En Europe, les lignes aériennes mesurent 270 000 kilomètres,

et la longueur totale des fils qui les composent est de 700 000 kilomètres. La France possède 44 000 kilomètres de lignes, et 123 000 kilomètres de fils; en 1851, ce dernier chiffre ne s'élevait qu'à 2000 kilomètres.

Le nombre des dépêches expédiées s'est accru dans une proportion énorme. Pour donner une idée de l'activité de la correspondance dans les pays industriels, citons l'Angleterre, qui, dans le cours de l'année 1870, a vu passer dans son réseau environ 10 200 000 dépêches, 203 600 dépêches par semaine. M. W. Huber, à qui nous empruntons ces détails statistiques, nous apprend que le 18 juillet 1870, jour où la déclaration de guerre entre la France et la Prusse fut connue à Londres, 20 592 dépêches ont passé par la seule station centrale. Le réseau télégraphique indien a expédié, en 1871, 33 000 dépêches; malgré le prix élevé de la correspondance par les câbles transatlantiques, 240 000 dépêches ont franchi, en une seule année, l'Océan.

Ces données statistiques suffisent pour qu'on se fasse une idée de l'essor qu'ont pris les correspondances rapides en divers points du globe; mais elles seront complétées heureusement, croyons-nous, par l'examen de l'état actuel du réseau universel, que représente la carte de la planche XXII. Cette carte est une reproduction de celle qui accompagnait la notice, citée plus haut, de M. W. Huber, moins cependant les lignes ou projets abandonnés, ceux-ci n'offrant plus qu'un intérêt rétrospectif. Les lignes télégraphiques intérieures des diverses contrées d'Europe et d'Amérique n'auraient pu être indiquées sans confusion. Celles-là seulement sont figurées, qui desservent les grandes lignes générales et relient les continents par l'intermédiaire des lignes sous-marines. L'Europe est en communication directe avec le continent américain du nord par trois câbles, dont deux partent de Valentia (Irlande), et l'autre de Brest, pour aboutir à Trinity-Bay, dans l'île de Terre-Neuve, et à Saint-Pierre Miquelon, puis gagner de là le territoire des États-Unis. Un quatrième câble doit être incessamment posé entre Land's-

End, pointe occidentale de Cornouailles, Halifax et New-York. L'Amérique du Sud sera aussi prochainement reliée à l'Europe par une ligne sous-marine qui passera par Madère, les îles du Cap-Vert, et aboutira à l'extrémité la plus orientale de l'Amérique, au cap Saint-Roque (Brésil).

Dès maintenant, les Indes sont en communication télégraphique avec l'Europe par deux lignes : l'une suit la mer Rouge, puis, par la Méditerranée, se ramifie en diverses branches, qui vont en Sicile et en Italie, en France, et enfin en Angleterre, en côtoyant le Portugal, d'où elles gagnent la pointe sud-ouest de la Grande-Bretagne par l'Atlantique; l'autre ligne se ramifie également, à partir du golfe Persique, en plusieurs lignes aériennes qui gagnent la Russie, l'Allemagne, la Syrie. Enfin, l'Australie elle-même communique avec le réseau indien ; de sorte qu'une dépêche partie de Sydney arrive directement à New-York ou à Boston, et de là, par le télégraphe qui traverse le continent américain, jusqu'à San-Francisco, sur les bords de l'océan Pacifique. 270° de longitude, et, en distance effective, plus de 30 000 kilomètres, sont franchis par les signaux électriques en moins d'une heure. Le fait suivant, dont nous empruntons le récit à M. Huber, suffira pour donner une idée de la rapidité de la correspondance électrique :

« Le 12 novembre dernier, dit-il, un banquet réunissait au même moment, à Londres et à Adélaïde, les intéressés à cette grande ligne de 35 852 kilomètres, dont 28 kilomètres de câbles sous-marins (la ligne transaustralienne). A Londres, un appareil télégraphique avait été installé derrière le fauteuil du président. A l'ouverture du banquet, une dépêche de félicitation part pour l'Australie. A la fin du banquet, la réponse, terminée par un *hurrah!* arrivait d'Adélaïde. »

L'examen de la carte montre qu'une lacune existe encore pour que la circonférence entière du globe soit enlacée par le réseau. L'Amérique et l'Asie ne communiquent pas encore directement ensemble. Mais quatre lignes, dont deux entièrement sous-marines, sont projetées : l'océan Pacifique sera sans



Gravé chez Erhard

RÉSEAU TÉLÉGRAPHIQ

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES TER



: DU GLOBE TERRESTRE

TRES ET LIGNES SOUS-MARINES

doute bientôt traversé par les courants électriques, comme l'Atlantique l'est depuis huit années. Bientôt les dépêches arriveront à Paris et à Londres de tous les points les plus éloignés du globe, et on lira le soir, dans les journaux, le récit des événements principaux arrivés pendant le jour (et aussi la nuit) dans les cinq parties du monde. C'est à chacun de conjecturer quelle sera, pour l'avenir, l'influence de ces communications continues au point de vue des relations politiques, commerciales, industrielles, en un mot, au point de vue de la civilisation progressive.

CHAPITRE VI

HORLOGERIE ÉLECTRIQUE

§ I — Les Compteurs électro-chronométriques

La rapidité avec laquelle se propagent les courants électriques, la presque instantanéité avec laquelle se produisent les mouvements de deux mécanismes convenablement disposés et reliés par un fil conducteur, ont suggéré l'idée d'appliquer à l'horlogerie le principe de la télégraphie électrique elle-même. Le synchronisme de ces mouvements permet, en effet, de faire marcher en parfaite concordance un nombre quelconque de cadrans installés en des points plus ou moins éloignés les uns des autres, par exemple dans les diverses stations d'une ligne de chemin de fer. Il suffit de mettre en relation électrique chacun de ces cadrans avec un régulateur unique. C'est un premier problème qui est en effet résolu, et les systèmes imaginés dans ce but fonctionnent depuis longtemps, soit sur les voies ferrées, soit dans quelques villes, dont les horloges publiques sont réglées de cette manière.

Mais il y a un autre problème qui a été également résolu, c'est celui qui consiste à appliquer l'électricité au mouvement même de l'horloge régulatrice. C'est aux appareils de ce der-

nier genre qu'on réserve ordinairement le nom d'*horloges électriques*; les mécanismes qui ont pour objet de transmettre au loin à des cadrans le mouvement d'un régulateur ordinaire ont reçu le nom de *compteurs électro-chronométriques*.

Enfin, on a demandé aussi à l'électricité le service de solidariser un certain nombre d'horloges, ayant chacune leur moteur et leurs mécanismes séparés, de manière à rétablir régulièrement l'accord de leurs marches indépendantes.

Dans ces diverses applications, comme en télégraphie, les systèmes sont nombreux. Nous devrons donc nous borner à décrire, parmi ceux qui ont reçu la sanction de l'expérience, un ou deux types propres à bien faire comprendre tout ce qu'il y a d'ingénieux dans cette nouvelle application de l'électro-magnétisme.

Nous décrirons d'abord les compteurs *électro-chronométriques*.

Deux parties distinctes composent un système de ce genre, absolument comme tout appareil télégraphique. Il y a d'abord à considérer le mécanisme adjoint à l'horloge régulatrice, qui a pour objet de transmettre et d'interrompre périodiquement, à intervalles égaux, le courant de la pile ou de tout autre électromoteur. Ce courant communique le mouvement à l'appareil récepteur, c'est-à-dire au mécanisme qui fait mouvoir l'aiguille de chaque cadran : c'est l'*indicateur*.

Prenons pour exemple le compteur de M. P. Garnier.

L'horloge-type est une horloge ordinaire. Voici la disposition très-simple à l'aide de laquelle cette horloge en mouvement permet le passage et la rupture successive du courant dans le circuit. Le dernier mobile du rouage ordinaire porte sur son axe un moulinet *m* à quatre dents excentriques. La rotation de ce moulinet, tantôt soulève le crochet *d* du levier *l*, tantôt le laisse retomber. Dans le premier cas, que représente la figure 383, les deux pôles + et — de la pile communiquent par le contact des deux leviers métalliques *t* et *l* : le circuit est fermé, le courant passe. Dans l'intervalle du passage d'une dent à

l'autre, le levier *l* retombant, le contact cesse, le circuit est ouvert et le courant interrompu. Les contacts des deux pièces sont en or ou en alliage de platine et d'or, afin d'éviter l'oxydation que provoque le passage de l'électricité. L'*indicateur* du compteur Garnier est représenté, dans ses parties essentielles, par la figure 384. Un électro-aimant EE attire ou repousse, selon que le courant lancé par l'horloge-type passe ou est interrompu, une armature M, qui elle-même, par la tige T, soulève le levier LL. Une des extrémités de ce levier porte un

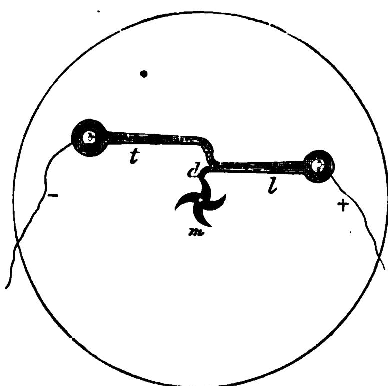


Fig. 383. — Compteur électro-chronométrique de P. Garnier : mécanisme transmetteur.

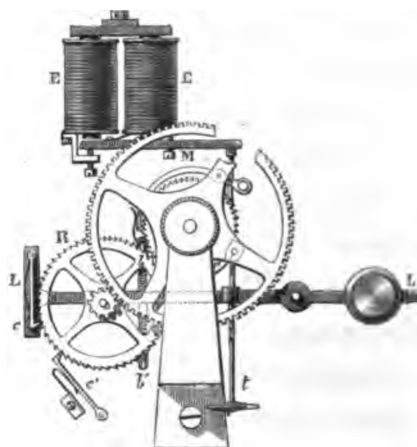


Fig. 384. — Indicateur du compteur électro-chronométrique Garnier.

cliquet *c* qui, en se soulevant, fait avancer d'une dent la roue à rochet R. Deux butoirs, *b* et *b'*, empêchent d'ailleurs cette roue d'avancer de plus d'une dent ou de reculer. Le courant est-il rompu, l'armature retombe sur la vis que porte une des bobines sur son bord inférieur; le levier LL s'abaisse, et le cliquet *c* vient se mettre en prise avec la dent suivante, qu'il entraîne de nouveau, dès que le circuit fermé anime l'électro-aimant.

De la roue à rochet, le mouvement passe, par des engrenages convenablement combinés, à la minuterie qui fait marcher les deux aiguilles du cadran. L'horloge-type et l'indicateur étant donc réglés pour marcher d'accord une première fois, cet

accord se continue tant que dure l'action de la pile, et que cette action a une énergie suffisante pour l'attraction de l'armature.

Voici maintenant de quelle manière une série d'indicateurs est reliée à l'horloge-type, et comment ils peuvent marcher tous sous l'influence unique de l'impulsion de la première, sans qu'une interruption dans l'un d'eux puisse réagir sur les autres.

Deux gros fils métalliques AB, CD, partent de la pile P, après avoir traversé, comme nous l'avons vu, l'horloge-type H. De chacun de ces fils partent d'autres paires de fils *ab*, *a'b'*, etc., de plus petit diamètre, qui communiquent avec chaque indicateur *o*, *o'*, *o''*... Par ce moyen, le circuit principal se divise en

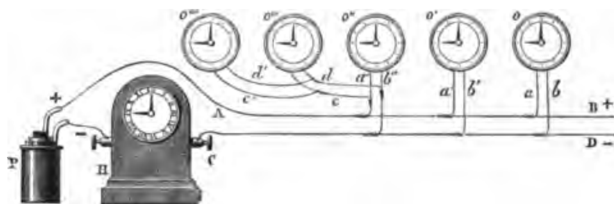


FIG. 385. — Liaison télégraphique de l'horloge-type et des indicateurs.

autant de circuits dérivés qu'il y a d'appareils horaires, et communique indépendamment le mouvement à chacun d'eux. On peut aussi embrancher les fils *cd*, *c'd'*, d'un ou de deux indicateurs, tels que *o'''*, *o''''*, sur ceux d'un autre *o''*.

On voit que c'est la pesanteur qui agit comme force antagoniste dans le compteur de M. P. Garnier : il en résulte que ses appareils ne peuvent fonctionner qu'à une condition, c'est d'être placés dans une position verticale. L'avantage est dans la constance ou l'invariabilité de cette force, constance qui n'existe pas, quand elle est due à l'élasticité des ressorts.

Dans le système Froment, l'horloge-type était, à l'origine, une horloge ordinaire portant une roue à rochet dont les dents venaient, à chaque seconde, effleurer un ressort fixe. Ce ressort n'était autre chose qu'une mince lame d'or, en communication avec l'un des pôles de la pile, la roue étant elle-même reliée

électriquement à l'autre pôle. Il y avait donc, à chaque seconde, passage, puis interruption du courant. Depuis, M. Froment a substitué un régulateur électrique à l'horloge-type ordinaire.

Quant au compteur ou indicateur, la figure 386 en représente la disposition. L'armature MN est composée, dans sa partie ON, d'une rallonge de cuivre, à laquelle vient s'articuler le système de deux leviers SPQN, dont les branches SQ, QN, tendent à se redresser lorsque, par le passage du courant, l'armature est

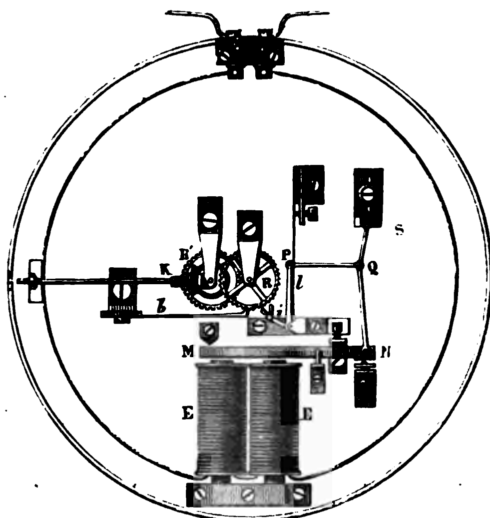


Fig. 386. — Compteur électro-chronométrique Froment : indicateur.

attirée. La tige PQ agit alors sur le levier coudé Pi, et le cliquet i fait avancer d'une dent la roue à rochet R. Quand le courant est interrompu, l'armature est ramenée par l'action du ressort l, les branches SQN s'infléchissent de nouveau, et l'encliquetage laisse libre la roue à rochet. Le cliquet b empêche tout mouvement de recul.

Le mouvement est communiqué à la minuterie de l'appareil par le pignon de la roue R′, et un engrenage de roue d'angle permet de remettre les aiguilles à l'heure à l'aide de la tige K, qui est terminée par un carré aboutissant vers la circonférence du cadran.

L'originalité du compteur Froment réside surtout dans l'emploi du *répartiteur* SPQN. Cet intermédiaire mécanique a pour objet de proportionner la résistance avec la force attractive de l'électro-aimant sur l'armature. Cette attraction est maximum quand la distance est la plus petite possible, c'est-à-dire au moment du contact : c'est donc au moment où le mouvement va cesser, que la vitesse des pièces atteindrait sa plus grande valeur, ce qui offrirait un grave inconvénient pour le mécanisme. Grâce au répartiteur en question, la résistance croît dans la même mesure que l'attraction, de sorte que la force attractive de l'électro-aimant reste ainsi constante.

Les compteurs électro-chronométriques de MM. Bain, Bréguet, Robert Houdin, Nollet, mériteraient également d'être décrits; mais nous devons nous borner aux systèmes précédents, en mentionnant seulement les applications qui ont été faites avec succès. A Paris, à Lyon, à Marseille, à Bruxelles, à Gand, à Leipzig, des compteurs de ces différents systèmes ont fonctionné et fonctionnent encore, et répartissent l'heure avec régularité et concordance dans les divers quartiers de ces villes.

Les *lanternes-horloges* ne sont autre chose que des réverbères à gaz, à l'intérieur desquels sont disposés les compteurs, et qui portent sur une ou deux de leurs faces les cadrans horaires. MM. Nollet à Gand, Detouche à Paris, Bréguet à Lyon, ont construit des appareils de ce genre. La figure 387 représente extérieurement et intérieurement l'une des vingt-quatre lanternes-horloges installées à Lyon par M. Bréguet. On voit que les électro-aimants E, E' y sont doubles ; ils sont placés de telle façon que leurs pôles opposés se regardent, de sorte que l'armature M, qui est aimantée, est à la fois attirée par l'un, repoussée par l'autre, et inversement, selon que le courant circule dans l'un ou dans l'autre des électro-aimants. La tige T qu'elle porte agit, par une fourchette munie d'une goupille, sur deux pièces ou cliquets *i*, *i'*, qui jouent le rôle d'une ancre d'échappement, et font mouvoir les dents d'une roue à rochet, dont l'axe porte l'aiguille des minutes.

Pour que des compteurs électro-chronométriques, quel que soit d'ailleurs le système adopté, fonctionnent avec constance et régularité, il est clair qu'il faut une surveillance et des soins continus. Le bon état des diverses pièces, celui de l'horloge-type, et surtout l'entretien de la pile, sont des conditions de toute nécessité. Elles sont si évidentes, que nous n'insistons pas. Mais comme, après tout, l'une d'elles peut manquer, il est clair

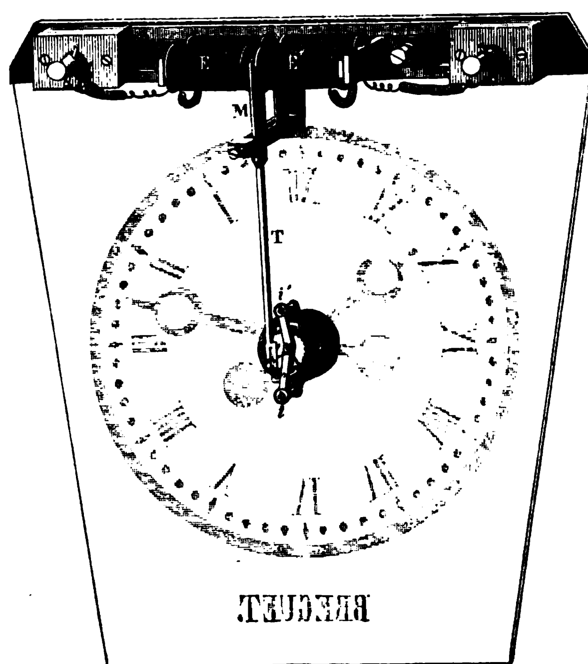


Fig. 387. — Lanterne-horloge de M. Bréguet.

que ce qui fait la supériorité d'une installation de ce genre sur l'horlogerie ordinaire, la solidarité des horloges d'une même ville ou d'une ligne, constituerait un grave inconvénient en cas d'interruption. Il importe donc, non-seulement que les compteurs soient indépendants, comme on l'a vu dans le système de M. Garnier, mais aussi que l'impulsion ne soit pas donnée par un régulateur unique : en divisant une ville par quartiers, dont chacun possède un régulateur, on diminuera dans une égale proportion l'inconvénient signalé.

§ II — Horloges électriques proprement dites

Nous avons vu, dans le livre consacré à la pesanteur, que la force motrice des horloges est empruntée, soit à un poids, soit à un ressort, et que le pendule sert à régler le mouvement communiqué aux rouages par le moteur. La régularité de leur marche dépend de celle avec laquelle s'effectuent les oscillations du pendule, dont les amplitudes doivent rester autant que possible invariables. Le mouvement du pendule est d'ailleurs entretenu par la réaction de l'ancre d'échappement.

Le problème qu'ont cherché à résoudre les inventeurs d'horloges électriques consistait à donner au pendule, directement et sans l'emploi du moteur et des rouages ordinaires, une impulsion empruntée à l'électricité, propre à perpétuer et à régulariser son mouvement. Voici quelques exemples de pendules électriques où cette condition se trouve réalisée.

Celle que représente la figure 388 est une des plus anciennes; elle est due à un savant et habile horloger de Beauvais, M. Vérité.

Le pendule B, suspendu au moyen d'une suspension à ressort ou isochrone, porte une traverse rigide AD, munie de deux chevilles qui se meuvent librement à l'intérieur de deux cloches métalliques C et C'. Celles-ci sont suspendues, par des fils d'argent très-fins armés de contre-poids *p*, *p*, à une bascule horizontale dont les deux branches sont isolées en leur milieu au moyen d'une pièce d'ivoire. Deux électro-aimants E et E' ont leurs pôles placés en face de deux armatures de fer doux portées par la bascule, et chacun d'eux est relié métalliquement à la branche correspondante de cette bascule, et d'autre part avec l'un des pôles de la pile. L'autre pôle communique par un fil avec la suspension du pendule.

Quand le pendule occupe, au repos, une position verticale, les

chevilles de la traverse AD ne sont en contact avec aucune des deux cloches. Mais le contact a lieu avec l'une d'elles, celle de droite, par exemple, si le pendule est mis en mouvement vers la droite. Par ce contact, le circuit est fermé et anime l'électro-aimant E′, qui attire la branche droite de la bascule. La cloche C′ s'abaisse, et par son poids agit sur la cheville en imprimant au pendule une impulsion qui donne à celui-ci un mouvement rétrograde.

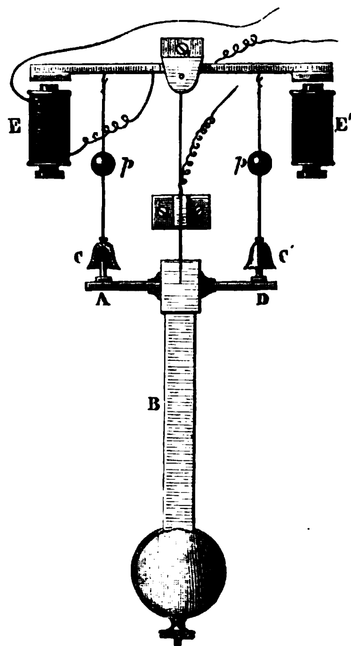


Fig. 388. — Horloge électrique Vérité.

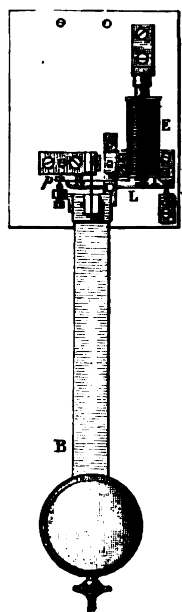


Fig. 389. — Pendule électrique Froment.

Par le fait de ce mouvement, le contact de la cheville avec C′ cesse, le courant est rompu. Mais le pendule, en s'écartant vers la gauche, détermine le contact de la cheville de gauche avec la cloche C ; le circuit est fermé de ce côté ; l'électro-aimant E agit sur la branche gauche, et à son tour la cloche C pèse sur le côté A de la traverse du pendule, et ainsi indéfiniment.

L'horloge électrique de M. Froment reçoit son mouvement de l'action périodique d'un petit poids *p*, qui vient s'appuyer sur une vis latérale, toutes les fois que le circuit est fermé. Voici

comment est disposé et fonctionne le régulateur. Le pendule B, suspendu par un ressort isochrone, est en communication directe avec le pôle positif de la pile. L'autre pôle est relié au fil de l'électro-aimant E, qui communique avec une lame de ressort, à l'extrémité de laquelle est soudé le poids *p*. La branche R d'un levier RL soutient cette lame et le poids, quand le circuit est ouvert; l'autre branche L porte une armature qui est attirée par l'électro-aimant toutes les fois que le circuit est fermé et que le courant passe. Or, l'ouverture et la fermeture du circuit sont produites successivement à chaque oscillation du pendule. Pendant la moitié de cette oscillation qui a lieu vers la gauche, la vis vient toucher le poids *p*; le circuit est fermé, l'armature attirée, et la branche R du levier cesse de soutenir la lame et le poids, qui agit alors sur la vis, et par suite sur le pendule, pour lui donner une impulsion rétrograde. Alors le contact cesse, le circuit s'ouvre, l'armature reprend sa position primitive, et le poids cesse d'agir. Deux vis V et V′ limitent d'ailleurs la course de la branche L du levier. C'est, comme on voit, l'action d'un poids constant qui, à chaque oscillation, entretient le mouvement du pendule.

Le régulateur électrique de M. Robert Houdin est représenté dans la figure 390. Le ressort de suspension du pendule P est, en *o*′, en communication avec le pôle positif de la pile. Il est muni de deux bras arqués B et B′, qui viennent alternativement en contact avec deux lames de ressort, et ferment ainsi le circuit, tantôt par l'électro-aimant E, tantôt par l'électro-aimant E′.

Supposons que l'oscillation du pendule ait lieu du côté droit de la figure, et que le contact se fasse alors par le bras B. Le courant, suivant les fils dans le sens marqué par les flèches, passe par E′; la branche de gauche de l'armature AA, étant attirée, soulève la lame de ressort qui agit, par l'intermédiaire des tiges *t*′, *l* et d'un cliquet, sur la roue à rochet, pour la faire avancer d'une dent. Le même mouvement soulève la petite masse *l* et amène le crochet *c*′ au-dessous de la lame, qui se trouve ainsi encliquetée, tandis que la lame de droite est dégagée du cro-

chet c et peut agir par son poids pendant le mouvement rétrograde du pendule. Alors le contact cesse, le courant est interrompu, l'armature de gauche cesse d'être attirée, la tige t' s'abaisse et repousse le cliquet correspondant au-dessus d'une nouvelle dent de la roue à rochet.

Le mouvement du balancier vers la gauche amène le contact de B′ avec la lame de ressort de gauche. Le courant circule à travers l'électro-aimant E, l'armature de droite est attirée, et les mêmes mouvements que nous venons de décrire se produisent sur les pièces symétriquement placées; de sorte que c'est maintenant la lame du ressort de gauche qui, dégagée, va agir par son élasticité et son poids sur le bras B′ du pendule, et le cliquet r' fera avancer à son tour la roue à rochet d'une dent. Deux contre-poids e, e', qu'on peut fixer à des distances différentes sur les lames de ressort, permettent de régler l'action motrice de ces lames, et par suite de régler la pendule elle-même.

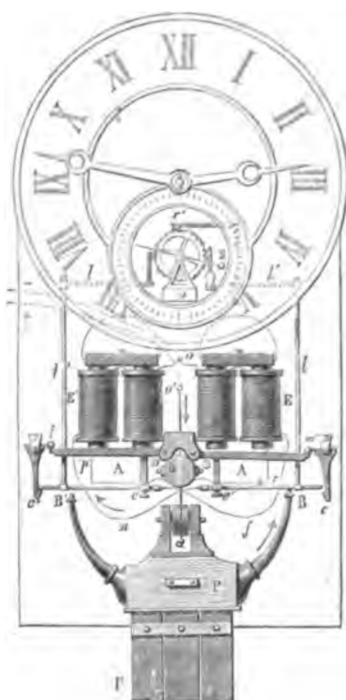


Fig. 390. — Pendule électrique Robert-Houdin.

Décrivons encore une pendule électrique fort ingénieuse, qui, comme les précédentes, peut être à volonté construite pour marcher seule, ou pour servir de régulateur ou d'horloge-type à une série de cadrans reliés électriquement avec elle. Elle est due à un horloger de Neufchâtel, M. Hipp.

Décrivons d'abord le mécanisme du régulateur. Il se compose d'une minuterie à laquelle le mouvement est communiqué par les oscillations d'un pendule. Tant que les oscillations du pendule conservent une amplitude suffisante, l'électricité n'intervient

pas. Au contraire, si cette amplitude diminue, le courant agit par l'attraction des pôles d'un électro-aimant, et une impulsion donnée au pendule rend à celui-ci le mouvement dont il a besoin et l'entretient d'une façon régulière.

Voici comment.

L'électro-aimant E est fixé solidement au-dessous du pendule, de façon que la ligne de ses pôles se trouve un peu à côté de la tige dans sa position verticale. Le pendule porte en A une armature qui, à chaque oscillation, passe à une très-faible distance des pôles (environ une double épaisseur de papier). Au-dessous et à son extrémité est fixée une palette p ou petite plaque d'acier, articulée sur un axe horizontal autour duquel elle peut se mouvoir librement, et terminée en lame de couteau.

Cette palette, à chaque oscillation du pendule, va et vient avec lui et glisse, sans appuyer, sur une pièce saillante munie de deux coches qu'on nomme la détente, et qui est portée par une lame de ressort r communiquant par une de ses extrémités avec le pôle négatif de la pile. Quand le mouvement du pendule a une suffisante amplitude, la palette dépasse la détente, mais si ce mouvement se ralentit, elle s'arrête dans la position marquée par la figure, et, au commencement de l'oscillation opposée, elle vient heurter contre l'une des coches. Si la détente alors ne pouvait s'abaisser, le pendule s'arrêterait, mais la lame de ressort qui porte la détente cède, le contact se fait avec la borne qui reçoit l'autre fil de pile, et le circuit est fermé. L'électro-aimant animé, l'armature du pendule est attirée, et c'est cette attraction qui détermine l'impulsion nécessaire à l'entretien du mouvement du pendule. A l'oscillation suivante, tout est rétabli dans l'ordre primitif, et c'est seulement quand une nouvelle impulsion devient nécessaire, que l'électricité est mise en jeu.

Le temps qui s'écoule entre deux impulsions successives dépend de la force de la pile : c'est ce que M. Hipp nomme la *durée d'impulsion*. Elle peut être de plusieurs minutes, ou seu-

lement de plusieurs secondes. Avec un élément de pile Leclanché, un régulateur de ce système peut marcher plusieurs mois.

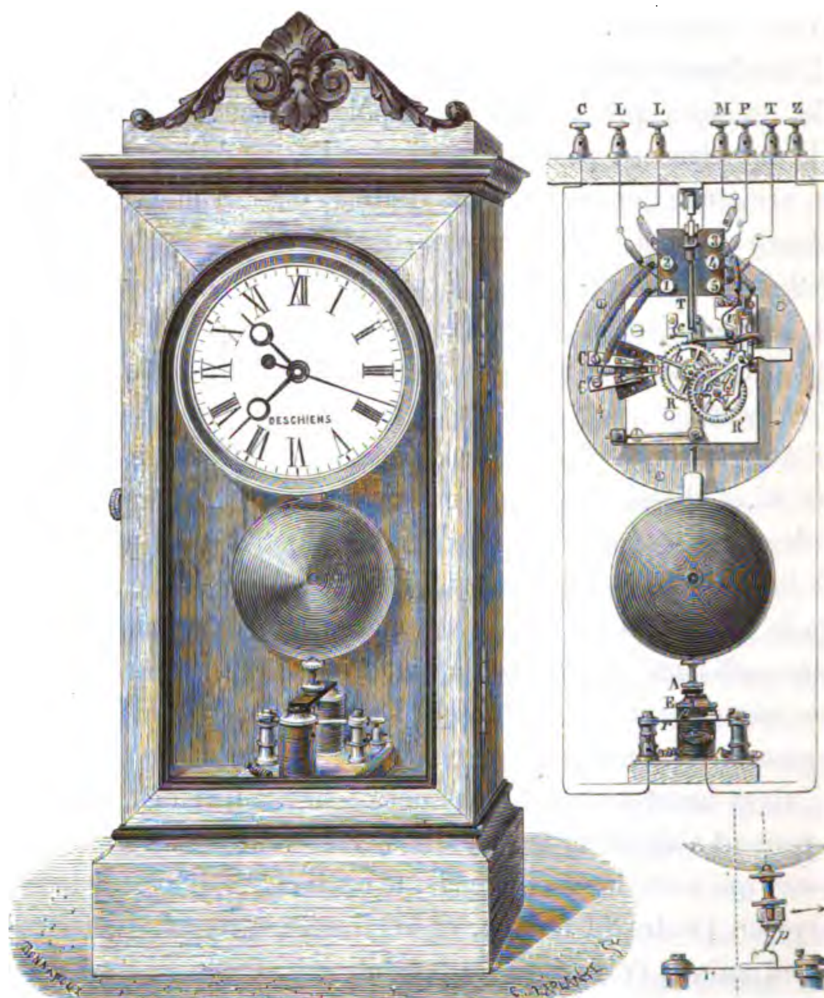


Fig. 391. — Horloge électrique de M. Hipp : vue extérieure.

Fig. 392. — Détails du mécanisme régulateur et distributeur.

Arrivons maintenant au mécanisme distributeur, qui permet de transmettre l'heure du régulateur à un nombre quelconque de compteurs chronométriques reliés électriquement avec lui et avec la pile.

La roue à rochet R, dont les dents sont au nombre de soixante, et qui, à chaque impulsion du pendule, marque une seconde, porte sur son axe un rayon ou branche métallique *b* qui fait un tour par minute comme le rochet, et qui vient, à un moment donné, toucher une, deux ou plusieurs palettes reliées en CC aux fils de ligne. Un courant par minute est lancé ainsi dans chaque compteur, dont le mécanisme marche sous son influence. Comme ce mécanisme, que nous ne décrivons pas ici, exige un changement périodique du sens du courant, le régulateur porte un inverseur, dont le détail est représenté sur la gauche de la figure. Une roue R', mue par un pignon de la roue à rochet, porte sur ses rayons des chevilles qui appuient sur les branches d'un levier à fourchette *f* et le font osciller autour de son point d'appui. Deux lames de ressort, fixées à l'autre branche du levier, oscillent de cette façon autour d'une position moyenne, vont l'une après l'autre établir le contact, soit avec le pôle positif, soit avec le pôle négatif de la pile.

§ III — Chronographes et Chronoscopes

On utilise aussi la propriété que possède l'électricité de se propager d'une façon presque instantanée, à la mesure précise des intervalles de temps très-courts, par exemple à la mesure du temps que mettent les projectiles d'artillerie à parcourir la distance entre la bouche de l'arme et le but frappé. On nomme *chronoscopes* ou *chronographes* les appareils imaginés dans ce but, la seconde de ces dénominations étant particulièrement réservée à ceux qui enregistrent cette durée et en conservent une trace écrite.

C'est encore le nom de Wheatstone qui se présente au début de l'invention de cette ingénieuse application de l'électricité. Le chronoscope qu'il imagina en 1840 était d'abord disposé de la manière suivante.

A la station de tir, en A, est installé un appareil d'horlogerie C ayant un poids pour moteur et susceptible de donner, sur deux cadrans distincts, E, D, des dixièmes et des millièmes de seconde. Un électro-aimant placé derrière la boîte contenant le rouage est muni d'une armature qui, attirée quand le courant d'une pile passe, embraye le mouvement et arrête l'horloge. Il résulte de cette disposition, que si le courant cesse d'agir avec le départ du projectile et se trouve rétabli quand ce dernier frappe la cible, l'horloge marchera seulement pendant son trajet, dont elle indiquera par conséquent la durée précise.

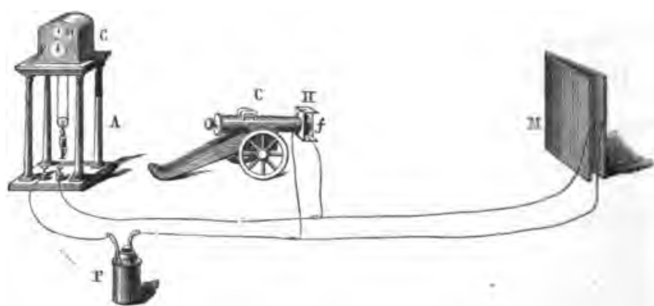


FIG. 393. — Chronoscope de Wheatstone.

Voici comment cette condition se trouve réalisée. La pile P communique d'une part avec le chronoscope, d'autre part avec la cible M, et, par un fil dérivé, au canon C. Le fil *f* passe au devant de la bouche H de l'arme.

Un peu avant de commencer l'expérience, on ferme le circuit dérivé et le courant passe; dès lors l'horloge est arrêtée. Alors on commande le feu : le fil est coupé par le boulet, le circuit est rompu, et l'horloge désembrayée marche, jusqu'au moment où, en frappant la cible, le projectile met en contact les deux fils qui s'y rattachent et ferme de nouveau le circuit. L'horloge est arrêtée de nouveau, et la marche des aiguilles sur les deux cadrans permet de lire, en secondes et fractions de seconde, la durée exacte du trajet.

M. Wheatstone reconnut lui-même les inconvénients de ce

premier appareil : le magnétisme rémanent de l'armature était cause que son contact était maintenu un peu après la rupture du courant ; d'autre part, les mouvements des aiguilles n'étaient pas arrêtés instantanément aussitôt après le choc de la cible : si petites que fussent ces différences, elles suffisaient pour rendre incertaines les indications du chronoscope, surtout pour d'aussi faibles fractions de seconde. L'inventeur parvint à corriger en partie ces causes d'erreur, en n'employant au début qu'un courant d'une très-faible intensité et en disposant les fils du circuit, de manière qu'à l'instant du choc de la cible, une pile beaucoup plus énergique pût agir pour refermer le circuit et donner le mouvement convenable à l'armature.

M. Hipp a aussi modifié le chronoscope Wheatstone, en rendant indépendants les mouvements de l'horloge et ceux des aiguilles indicatrices : que celles-ci soient ou non en repos, le rouage continue sa marche. Les aiguilles ne sont en mouvement que pendant le trajet du projectile.

Nous nous bornerons à mentionner : le chronoscope de M. Pouillet, qui était fondé sur la grandeur de la déviation qu'un courant d'une intensité connue imprime à l'aiguille d'un galvanomètre, selon le temps pendant lequel le courant passe ; — le chronographe de MM. Bréguet et Constantinoff, qui consiste en un cylindre tournant, à la surface duquel deux styles, maintenus par des électro-aimants, venaient successivement tracer une ligne, quand le projectile rompait deux fils au départ et à l'arrivée, et interrompait ainsi les circuits : la position des lignes tracées sur le cylindre indiquait la fraction de tour que ce dernier avait parcourue pendant le trajet du projectile ; — le chronographe du capitaine Navez, qui a servi avec succès à de nombreuses expériences balistiques, en Belgique et en Hollande ; — les chronographes de M. Martin de Brettes, à l'aide desquels ce savant officier d'artillerie a pu constater la vitesse initiale des projectiles et leur vitesse en un point quelconque de leurs trajectoires ; — enfin le chronoscope à pointage de M. Bréguet. La place nous manque pour décrire, comme ils le méritent, ces appareils

ingénieux et utiles, que nous sommes loin d'avoir cités tous. Il suffit, pour le but que nous nous proposons, d'avoir fait comprendre par un exemple la possibilité d'utiliser l'électricité pour la mesure précise d'éléments aussi difficiles à recueillir que les données de la balistique.

M. Wheatstone a appliqué les méthodes chronoscopiques à l'étude et à la constatation des lois de la chute des corps.

CHAPITRE VII

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

---

§ I — Moteurs électriques oscillants

Dans la télégraphie, dans l'horlogerie électrique, c'est la force vive des courants de la pile ou des courants d'induction qui est le principe des mouvements à l'aide desquels s'effectuent et se transmettent les signaux; en un mot, l'électricité y est employée comme agent mécanique ou force motrice. Mais l'emploi de cette force n'est pas de développer de la puissance, et même, le plus souvent, elle ne sert qu'à régler le jeu d'une autre force, celle de la pesanteur par exemple, dont elle permet de suspendre ou de rétablir périodiquement l'action.

L'électricité ne peut-elle être employée directement comme force motrice, c'est-à-dire jouer le rôle de la vapeur dans les machines, qui, après avoir produit et emmagasiné une certaine quantité de mouvement, le distribuent à d'autres machines, où il se trouve transformé selon les besoins industriels? Cette question a reçu plusieurs solutions positives et pratiques, mais on va voir dans quelle mesure restreinte.

Bien que l'on cite diverses tentatives déjà anciennes, celle de Salvator del Negro, de Padoue, qui construisit en 1831

une machine où un aimant oscillait entre les pôles d'un électro-aimant ; celle d'un Allemand, Jedlick, inventeur d'une machine électromotrice à rotation directe ; c'est à Jacobi, de Saint-Pétersbourg, qu'on doit faire remonter la première invention sérieuse de ce genre. En 1839, un essai fut fait en grand de la machine de ce savant. « On l'appliqua, dit M. Du Montcel, à mettre en marche une petite barque chargée de douze personnes, et munie à cet effet de roues à palettes. On put, il est vrai, naviguer pendant plusieurs heures sur les eaux de la Néva ; mais la force développée, bien que provenant d'une pile de 128 grands éléments de Grove, ne put jamais dépasser les trois quarts d'un cheval-vapeur. Un si faible effet mécanique, déterminé par un courant si énergique, découragea complétement l'inventeur, qui, depuis lors, a toujours considéré cette application de l'électricité comme impraticable pour les travaux industriels. »

Nous diviserons, comme l'a fait M. Verdet, les machines électro-magnétiques en deux classes, correspondant à deux types distincts, celui des *machines oscillantes* et celui des *machines rotatives*, et nous donnerons un exemple de chacun de ces types.

Disons d'abord, d'après le même physicien, quels sont les principes caractérisques de ces deux types de machines. « Dans les *machines oscillantes*, une hélice ou un électro-aimant fixe attire, lorsqu'il est traversé par un courant voltaïque de direction convenable, soit une autre hélice ou un autre électro-aimant, soit un barreau aimanté, soit même un simple morceau de fer doux. Lorsque la pièce mobile approche du contact de la pièce fixe, le jeu de la machine fait mouvoir un commutateur par lequel l'attraction est changée en répulsion, ou remplacée par l'attraction d'une autre pièce située à l'opposé. La direction du mouvement est ainsi renversée, et, ces attractions se répétant indéfiniment, on en peut tirer le même parti que du va-et-vient du piston de la machine à vapeur. Dans les *machines rotatives*, les pièces mobiles et les pièces fixes sont disposées suivant les

rayons de deux roues concentriques ; le passage du courant fait marcher la roue mobile vers une position d'équilibre stable ; mais au moment où elle l'atteint, le jeu du commutateur change le sens de l'action des forces, et le mouvement de rotation se continue indéfiniment dans le même sens [1]. »

La machine électromotrice de M. Bourbouze appartient au premier type. Voici quelles en sont les dispositions essentielles.

Deux hélices magnétisantes EE, E′E′, sont disposées par paire de chaque côté d'un arbre vertical surmonté d'un balancier comme dans les machines à vapeur, et jouent le rôle des cylindres ou corps de pompe. Intérieurement et jusqu'à moitié de la hauteur des bobines, se trouvent des cylindres de fer doux, qui s'aimantent quand le courant de la pile passe dans les spires de chaque hélice. Aux extrémités du balancier sont articulées deux tiges, dont chacune porte deux cylindres de fer doux qui se meuvent librement en pénétrant dans les bobines, et qui sont attirés alternativement par les barreaux aimantés, dès que le courant communique à ceux-ci leur force magnétisante. On comprend donc que, si le courant passe successivement et alternativement dans chaque paire d'hélices, il en résultera un mouvement de va-et-vient des cylindres et de leurs tiges, et par suite un mouvement circulaire alternatif du balancier. A l'aide d'une bielle et d'un excentrique, ce mouvement est transformé en mouvement circulaire continu de l'arbre moteur de la machine et de son volant.

Il reste à montrer comment le courant de la pile est introduit successivement dans les spires de chaque hélice. Dans ce but, à l'arbre moteur de la machine est calé un excentrique, qui fait mouvoir dans une glissière une plaque d'ivoire *aob*, recouverte sur une partie de sa longueur d'une bande métallique.

Le fil du pôle positif de la pile communique par *p* avec les deux électro-aimants, et chacun de ceux-ci avec une des extré-

1. Verdet, *Exposé de la théorie mécanique de la chaleur*, leçons professées en 1862 devant la Société chimique de Paris.

mités intérieures de sa glissière, qui, en son milieu *o*, communique de son côté avec le pôle négatif de la pile. Supposons que la plaque *ab* occupe la position indiquée par la figure[1]. Le courant suit alors le chemin *p*E*eaon*, car le circuit est fermé de *p* en *n* en passant par les spires des bobines E, E. L'excentrique, en se mouvant vers la droite, ouvrira ce dernier circuit, mais alors il fermera celui qui passe par E′, E′, et c'est le fer doux de cet électro-aimant qui sera aimanté à son tour.

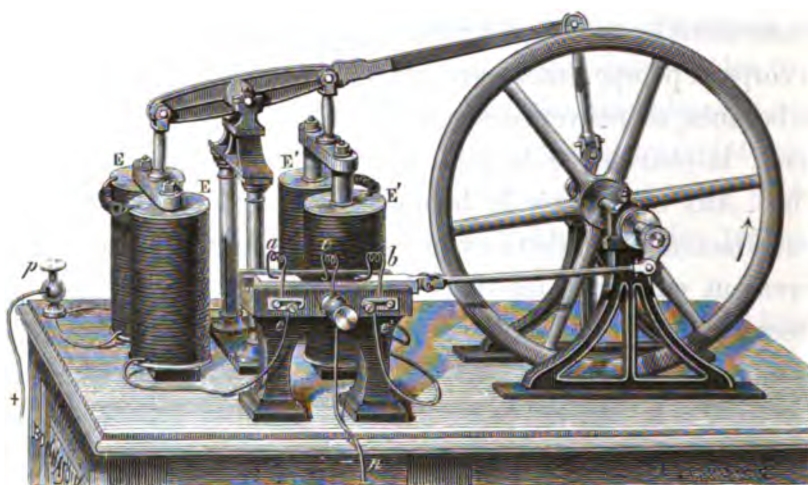


FIG. 394. — Machine électromotrice, système Bourbouze.

Ainsi, à tour de rôle, les cylindres moteurs seront attirés à gauche et à droite, et le va-et-vient des tiges et du balancier en sera la conséquence.

Les deux cylindres mobiles restent toujours très-rapprochés des cylindres intérieurs fixes ; cela est rendu indispensable par la loi qui, comme on sait, régit la force attractive des aimants ; cette force croît avec une rapidité extrême, à mesure que les masses attirées et attirantes approchent plus du contact. Aussi

1. Une erreur a été commise sur le dessin, relativement à la position de cette glissière. C'est le fil *a* qui doit toucher la plaque métallique, tandis que *b* repose sur l'ivoire. Nous prions le lecteur de supposer cette erreur corrigée, pour suivre l'explication du texte.

allonge-t-on le balancier par un levier assez grand, pour que le mouvement communiqué à la bielle de l'arbre moteur ait une amplitude suffisante.

Rien, comme on voit, n'est plus aisé à comprendre que ce mode de transformation du mouvement produit par l'attraction électro-magnétique en un mouvement alternatif, que la mécanique sait transformer elle-même en mouvement circulaire continu.

§ II — Moteur électrique a rotation continue

Voyons maintenant un type de machine magnéto-électrique, donnant directement un mouvement de rotation continu. C'est



Fig. 395. — Machine électromotrice à rotation continue, système Froment.

l'électromoteur Froment que nous prendrons pour exemple. La figure 395 en donne l'aspect général.

Six paires d'électro-aimants — la figure n'en représente que quatre, afin qu'on puisse voir les roues mobiles et leurs arma-

tures — sont disposées selon les rayons d'une circonférence et sont fixées au bâti de la machine qui porte l'arbre moteur, arbre dont l'axe horizontal coïncide avec le centre de la même circonférence. Des roues concentriques à celle-ci portent huit armatures de fer doux, rangées parallèlement à l'axe de rotation, et venant, pendant le mouvement, se placer deux par deux, en regard des pôles des électro-aimants.

Les huit armatures étant distribuées à intervalles égaux sur la circonférence de la roue mobile, et le nombre des électro-aimants pareillement distribués n'étant que de six, quand deux

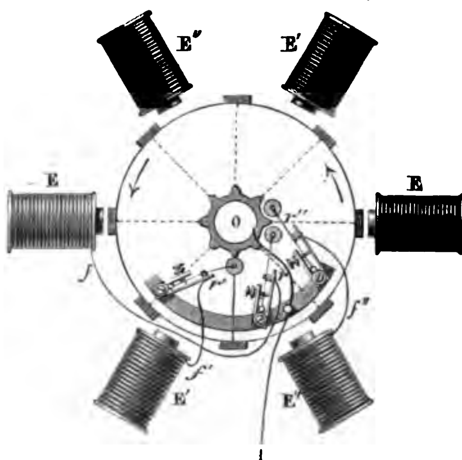


Fig. 396. — Électromoteur Froment; action des courants sur les armatures.

armatures opposées seront exactement en regard des deux électro-aimants E, E, les autres armatures se trouveront en avance ou en retard selon le sens du mouvement. Supposons-le dans le sens des flèches, ou de droite à gauche. En ce cas, le courant de la pile se trouve lancé dans les bobines E′, E′, et il a quitté les bobines E, E. Les armatures qui suivent dans le sens du mouvement vont donc être attirées, et le mouvement se continuera dans le même sens, jusqu'à ce que ces armatures se trouvent en face des pôles E′, E′. A ce moment, le courant quitte ces dernières bobines pour passer dans E″, E″, et ce sera maintenant au tour des armatures suivantes d'être attirées, et ainsi

indéfiniment. Il est clair que pendant un tour entier, il y aura autant d'attractions que l'angle d'avance des électro-aimants sur les armatures est contenu de fois dans la circonférence, c'est-à-dire vingt-quatre (la différence entre $\frac{1}{6}$ et $\frac{1}{8}$ est en effet $\frac{1}{24}$).

Ces interruptions et ces passages alternatifs du courant dans les bobines de la machine s'obtiennent à l'aide d'un distributeur, dont les figures 396 et 397 feront facilement comprendre la disposition et le rôle. Ce distributeur consiste en une roue R, centrée sur l'axe de rotation et munie de huit dents ou cames en nombre égal à celui des armatures et se mouvant avec elles : cette pièce est en communication constante avec le pôle positif

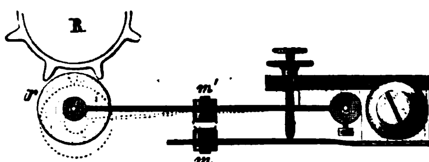


FIG. 397. — Distributeur de la machine électromotrice Froment.

de la pile. Trois ressorts r, r', r'', fixés à un secteur circulaire immobile et reliés chacun avec les paires diamétralement opposées des électro-aimants par des fils f, f', f'', ont leurs extrémités placées, par rapport aux dents de la roue, de la même manière que les bobines relativement aux armatures de fer doux. Quand deux armatures sont exactement en regard de E, E, le ressort r qui communique avec les électro-aimants E, E est en avance sur une dent qu'il vient de quitter, tandis que r' touche la dent précédente et ferme le circuit dans les bobines E', E'. Après un vingt-quatrième de tour, r' quittera la dent, et c'est r'' qui en touchera une à son tour, en lançant le courant dans les bobines E'', E''. En un mot, le circuit se trouvera fermé à chaque fraction de tour égale à $\frac{1}{24}$, et passera, par le ressort en contact avec une dent, dans les bobines qui se trouvent en avant des armatures de la même quantité angulaire. Le courant revient, après avoir animé chaque

paire de bobines, au pôle négatif par un fil commun. Il ne cesse d'ailleurs d'agir sur un électro-aimant qu'après être passé dans le suivant, disposition ingénieuse par laquelle on affaiblit l'étincelle qui se produit en vertu de la naissance de l'extra-courant. L'oxydation des contacts que cette décharge cause à la longue se trouve ainsi en grande partie atténuée.

§ III — Applications diverses des moteurs électriques

Les moteurs électriques ne peuvent, en aucune façon, lutter de puissance avec les moteurs ordinaires, tels que la machine à vapeur. On n'est guère parvenu à en construire dont la force équivaille à plus d'un cheval-vapeur. La raison en est donnée par les principes de la théorie mécanique de la chaleur : le travail des machines électromotrices est une autre forme de la puissance calorifique que les actions chimiques de la pile développent ; mais comme ce mode de production de la chaleur est beaucoup plus coûteux que celui qui consiste à brûler la houille nécessaire à la production de la vapeur, il en résulte nécessairement que la force électromotrice est beaucoup moins économique que celle de la vapeur d'eau. C'est ce que l'expérience a, du reste, entièrement confirmé.

Mais si les machines électriques ne peuvent lutter, sous ce rapport, avec la machine à vapeur ou les autres moteurs industriels; si leur emploi dans la grande industrie paraît impossible, il est des services d'un autre ordre qu'elles peuvent rendre, toutes les fois qu'il s'agit d'obtenir une force peu considérable, mais exigeant régularité, grande vitesse, action à grande distance. Dans ces conditions, elles ont une supériorité qu'augmentent encore la facilité de leur mise en train, de l'interruption du travail, l'absence de tout danger, le peu de place qu'elles nécessitent. L'inventeur de la machine à rotation directe que nous venons de décrire, l'habile et regretté M. Froment,

se servait de machines semblables pour les délicates opérations de mécanique scientifique auxquelles il se livrait. Il les utilisait à mouvoir des tours, des machines à diviser, ces engins si précis qui traçaient sur un tube de verre des divisions d'une extrême finesse, jusqu'à 1000 traits dans l'intervalle d'un millimètre. La précision, la délicatesse infinie de cette machine en faisaient une merveille mécanique. Qu'on en juge par ce passage d'un rapport de M. Dumas :

« Nous trouvant réunis à Londres, à l'occasion de l'Exposition, M. Froment, au milieu d'une séance, tire sa montre, et nous dit : « Il est midi moins dix secondes. A l'ordre de la pendule de mon cabinet, à Paris, mon diviseur entre en mouvement. Le diamant trace cinq traits en l'air, pour se mettre en train et pour réchauffer les huiles des jointures de ses supports. Il trace cinq traits inutiles sur la plaque de verre, pour s'assurer qu'il y mord. Il avance jusqu'à la place où doit commencer son travail ; il trace ses traits définitifs, courts pour les millièmes de millimètre, plus longs de cinq en cinq, un peu plus longs encore de dix en dix. Il en a tracé cinq cents. Il a fini sa tâche et reste en place, la pointe en l'air, prêt à recommencer. Mais, à son tour, il marque à la pendule midi trente secondes, pour qu'en revenant à Paris, le maître puisse s'assurer que son esclave électrique lui a scrupuleusement obéi. »

On le voit, ce n'est pas de la puissance, mais de la régularité ou de la vitesse qu'il faut demander à l'électricité considérée comme force motrice. C'est ce qu'on a fait dans la télégraphie et dans presque toutes les applications que nous avons déjà passées en revue. Donnons encore quelques exemples.

La force qui anime les électro-aimants, toutes les fois qu'un courant est lancé dans les fils de leurs bobines, a été utilisée dans l'opération métallurgique qui consiste à trier certains minerais, à séparer les parties les plus riches en métal des composés d'une autre nature. C'est ce qu'on peut faire pour les oxydes métalliques qui deviennent magnétiques par le grillage ou la réduction. On se sert alors d'une machine inventée par un

ingénieur français, M. Chenot, et qui a reçu le nom d'*électro-trieuse*. La figure 398 donne la vue d'ensemble de cet appareil.

On voit, à gauche, une trémie qu'on emplit de minerai en poudre destiné au triage. Le minerai s'écoule par le fond de la trémie, sur une toile métallique enroulée autour de deux cylindres, et de là est entraînée au-dessous de trois roues verticales munies d'électro-aimants fixés sur leur pourtour. Ces électro-aimants sont en rapport avec un commutateur fixé sur l'axe commun de rotation. A mesure que le mouvement les amène à la partie inférieure de l'appareil, ils reçoivent le courant et

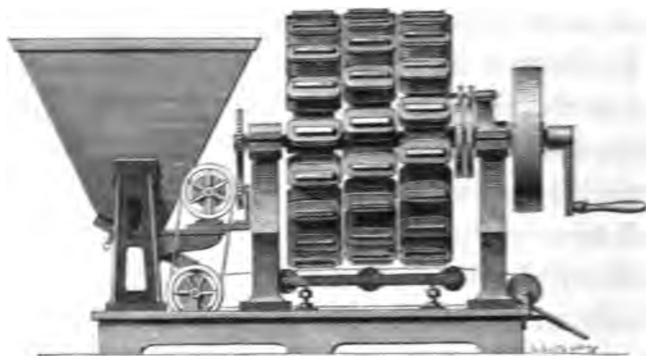


FIG. 398. — Électro-trieuse de M. Chenot.

deviennent actifs. La partie magnétique du minerai est seule attirée, et elle reste au contact des électro-aimants jusqu'au moment où le courant, cessant d'animer ceux-ci, va passer dans les bobines qui les remplacent. Alors ces parties retombent, tandis que les fragments non magnétiques sont rejetés en arrière, dans une seconde trémie. Le triage s'opère ainsi d'une façon continue.

Le même inventeur a construit une électro-trieuse où ce sont des électro-aimants fixes, constamment animés par le courant, qui attirent les matières magnétiques. Celles-ci sont alors transportées, au fur et à mesure de leur séparation, par un ramasseur tournant. Il est clair que ces machines peuvent être utilisées ailleurs qu'en métallurgie, dans toutes les industries

qui emploient des métaux magnétiques et des métaux non magnétiques, et qui, par exemple, ont besoin de séparer des limailles mélangées.

On sait que les voitures, les locomotives et tenders des trains de chemins de fer sont pourvus de mécanismes qui ont pour objet de ralentir ou d'arrêter au besoin le mouvement du train. On donne à ces organes mécaniques le nom de *freins*. Un ingénieur français, M. Achard, a eu l'idée d'emprunter à la force vive elle-même du train en marche la puissance qui doit peu à peu serrer les sabots des freins contre les roues des véhicules. Seulement, pour désembrayer le mécanisme qui doit agir dans ce sens, c'est à la force d'attraction d'un électro-aimant qu'il s'est adressé. Voici l'une des solutions du problème qu'il s'est posé et qu'il a résolu, car son système est appliqué sur diverses lignes.

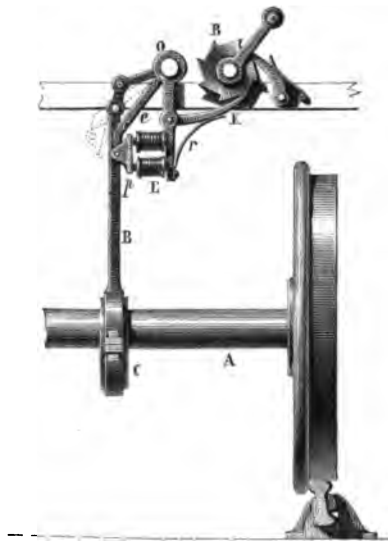


Fig. 399. — Frein électrique Achard : mécanisme de désembrayage.

L'essieu A du wagon porte un excentrique C qui produit le mouvement de va-et-vient de la bielle B, et l'oscillation d'un axe O rattaché à la bielle par un bras de levier. Cet axe porte lui-même un levier *e* dont l'extrémité est munie d'une palette *p* de fer doux, laquelle vient, à chaque oscillation, se placer en regard des pôles d'un électro-aimant E. Tant que le courant n'est pas lancé dans celui-ci, il n'y a pas d'attraction, et l'électro-aimant reste suspendu à la tige qui le porte. Mais si le mécanicien ou le garde-frein, à l'aide d'un commutateur à sa portée, ferme le circuit de la pile, aussitôt l'électro-aimant et la palette sont en contact magnétique, et tous deux oscillent ensemble. La tige de suspension de l'électro-aimant porte un cliquet K qui est

maintenu par un ressort *r* contre la roue dentée B. Une des huit dents de cette roue est ainsi poussée à chaque oscillation; la roue tourne d'un huitième de circonférence, et avec elle le mécanisme particulier du frein.

Quant au frein lui-même, ce n'est pas le lieu de le décrire. Il nous suffit de voir comment l'embrayage et le désembrayage sont déterminés par le passage d'un courant ou sa rupture.

CHAPITRE VIII

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

§ I — Régulateurs des lampes photo-électriques

Après la lumière du soleil, la lumière électrique, celle qui jaillit entre les deux cônes de charbon terminateurs des rhéophores d'une pile puissante, d'une forte machine d'induction, est la plus éblouissante de celles qu'on sait produire artificiellement à la surface de la terre. Aussi a-t-on cherché à utiliser cette lumière pour un grand nombre d'applications industrielles, militaires, scientifiques : on a tenté de s'en servir pour l'éclairage public des rues et des places des grandes cités, pour les travaux qui demandent à ne pas être interrompus pendant la nuit, pour les constructions sous-marines, les travaux des galeries de mines, les reconnaissances militaires nocturnes, la marine, les phares, enfin pour les effets singuliers de décoration dans les représentations théâtrales. Dans la plupart de ces applications si diverses, le succès a couronné les tentatives faites, mais non sans nécessiter des recherches spéciales et la solution de difficultés particulières.

L'une des principales de ces difficultés consistait dans la discontinuité de l'*arc voltaïque*. On sait en effet que, lorsque se

produit le jet lumineux entre les deux cônes de charbon, le courant transporte d'un cône à l'autre des parcelles excessivement ténues de matière : l'un des charbons paraît s'allonger aux dépens de l'autre; mais, en définitive, par le fait de la combustion, la distance des deux pointes va en augmentant; à mesure qu'elles s'émoussent, le courant s'affaiblit, l'intensité de la lumière décroît, et au bout d'un certain temps peut finir par s'éteindre. Dans le cas où le courant employé est celui d'une pile voltaïque, c'est-à-dire conserve constamment le même sens, l'usure des cônes de charbon est dans le rapport de 1 à 2 : c'est le charbon positif qui s'use le plus vite. Si la machine employée est une machine d'induction électro-magnétique, où le courant change de sens à chaque révolution, chacun des charbons se trouve être alternativement positif et négatif; l'usure est la même. Dans tous les cas, on comprend la nécessité où l'on se trouve, pour obtenir une source de lumière continue, de maintenir les pointes des deux cônes à une distance sensiblement constante. C'est à quoi on est parvenu au moyen des appareils qu'on nomme *régulateurs*.

Le principe des régulateurs de la lumière électrique est le courant lui-même : c'est la force électrique qu'on a précisément chargée de rapprocher les charbons, de les maintenir à une distance convenable. Pour cela, on fait traverser au courant les spires de la bobine d'un électro-aimant; une armature de fer doux vient au contact de ses pôles, quand le courant a une intensité suffisante, c'est-à-dire pendant tout le temps que les extrémités des cônes de charbon sont assez rapprochées pour donner lieu à un arc lumineux d'intensité convenable. En ce cas, l'armature est en rapport avec un mécanisme moteur, avec un rouage d'horlogerie qu'elle embraye; ce rouage ne fonctionne point, c'est-à-dire ne peut rapprocher les tiges qui portent les deux cônes de charbon. Ces derniers s'usent peu à peu, leur distance augmente, la résistance au passage du courant s'accroît et l'intensité du courant diminue. Un ressort antagoniste, qui maintient l'armature, finit par l'emporter sur l'attraction de

l'électro-aimant; le contact cesse et le mouvement de l'armature désembraye le rouage moteur. Ce rouage fonctionne donc de façon à rapprocher l'un de l'autre, dans une mesure convenable, les deux cônes. Alors le courant reprend peu à peu son intensité, un nouveau contact de l'armature s'ensuit, et le mouvement s'arrête, pour recommencer et s'arrêter ainsi indéfiniment.

Le principe des régulateurs bien compris, — la première réalisation et la première idée en sont dues à Léon Foucault, — on comprendra sans peine le mécanisme et le fonctionnement des plus usités de ces appareils.

Voici d'abord le *régulateur Duboscq*, qui avait été imaginé pour utiliser les courants continus fournis par les piles : ce savant et habile constructeur avait surtout en vue les applications scientifiques de la lumière électrique, et les auditeurs des cours publics de physique à la Sorbonne et ailleurs peuvent se rappeler d'avoir vu fonctionner son régulateur dans les expériences de projections microscopiques. L'arc voltaïque suppléait ainsi aux rayons solaires absents.

La figure 400 représente ce régulateur.

c et c' sont les deux crayons de charbon entre les pointes desquels jaillit l'arc lumineux. Le courant qui détermine la production de la lumière part du pôle positif de la pile, entre par la borne R, suit le fil q, la bobine de l'électro-aimant BB, la tige T, passe de c en c', et de là, par les tiges T′ et S, jusqu'à la borne R′ qui est en communication avec le pôle négatif de la pile.

Un contact mobile K, placé en regard du noyau de fer doux de l'électro-aimant, est attiré par les pôles de celui-ci, quand le courant conserve une intensité suffisante, c'est-à-dire quand les charbons sont suffisamment rapprochés. Alors ce contact appuie sur le bras horizontal du levier coudé L, mobile autour de F′. Le bras vertical L de ce levier, par l'intermédiaire d'un levier plus court lm, embraye une roue dentée que porte le régulateur g du rouage. Le mouvement de ce rouage est donc arrêté tant que le contact a lieu.

L'usure des charbons, le trop grand éloignement qui en est

la conséquence, affaiblit le courant ; le ressort antagoniste *s* l'emporte, éloigne l'armature des pôles de l'électro-aimant, et

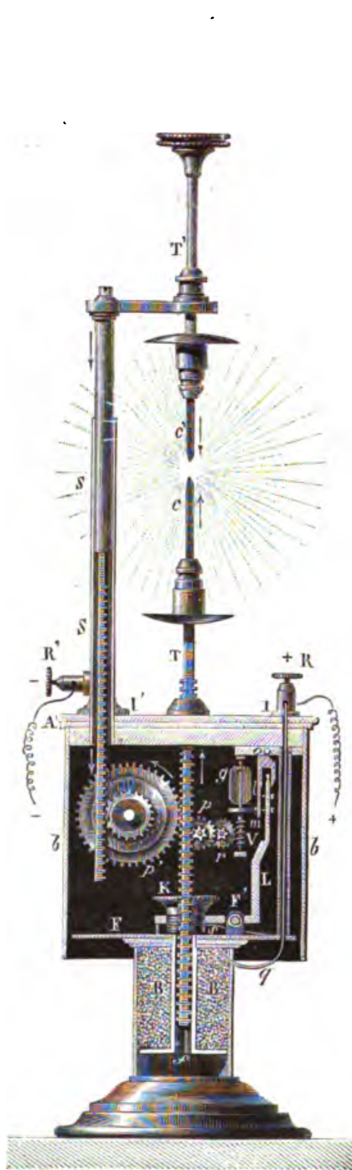


Fig. 400 — Régulateur photo-électrique Duboscq.

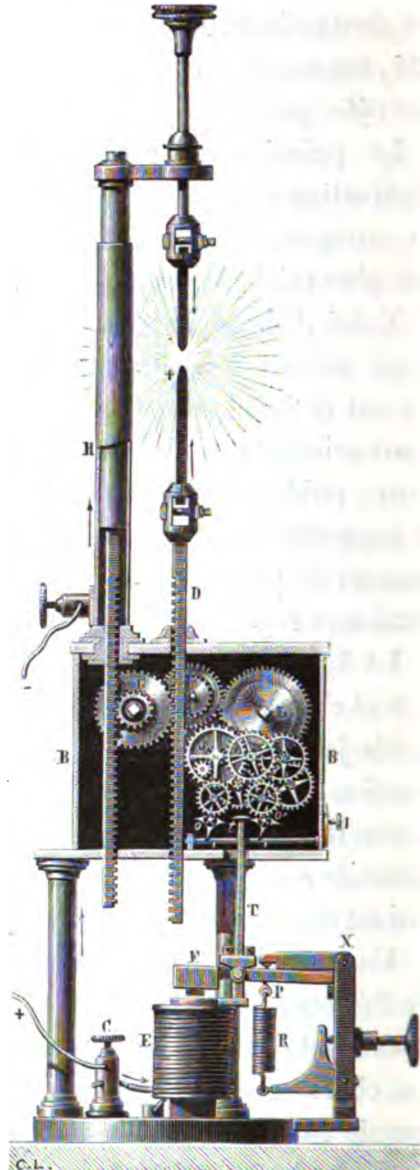


Fig. 401. — Régulateur photo-électrique Foucault.

le désembrayage a lieu. Le rouage *pp'* se met alors en mouvement, et les deux tiges à crémaillère S et T marchent en sens

contraire; les charbons *c* et *c'* se rapprochent, le courant et l'arc lumineux reprennent leur première intensité, ce qui détermine un nouveau contact et un nouvel arrêt. Et ainsi indéfiniment. La roue dentée qui fait marcher la crémaillère T a un rayon double de celui de la roue qui fait descendre la crémaillère S. Ainsi le charbon positif fait un chemin double du chemin parcouru par le charbon négatif. L'arc lumineux demeure ainsi à une hauteur constante.

Voyons maintenant les *régulateurs Foucault* et *Serrin*, tous les deux employés dans les applications industrielles de la lumière électrique. La figure 401 représente le premier de ces appareils.

Les tiges à crémaillère H et D qui portent les charbons sont à peu près disposées comme dans les régulateurs Duboscq; seulement les roues dentées qui les font mouvoir peuvent tourner dans deux sens opposés, parce qu'elles sont en relation avec un double mouvement d'horlogerie, dont l'un est embrayé, pendant que l'autre est en marche. De la sorte, les cônes de charbon sont susceptibles, soit de se rapprocher, soit au contraire de s'éloigner l'un de l'autre. Ce recul automatique des charbons dispense de la mise en train à la main, et prévient aussi leur contact accidentel, d'où résulterait une extinction de l'arc lumineux.

Les deux rouages sont munis de deux volants ou régulateurs à ailettes *o*, *o'*, sur chacun desquels vient agir alternativement la tête *t* d'un levier T, que fait mouvoir l'armature de l'électro-aimant E. Quand le volant *o* est en prise, le rouage correspondant est arrêté, mais alors *o'* est dégagé, et son rouage moteur libre. Un mouvement inverse de l'armature et du levier T produit un effet opposé. Disons maintenant dans quelles circonstances et par quel mécanisme se produisent ces mouvements contraires.

F est l'armature que les pôles de l'électro-aimant E attirent au contact, si l'intensité du courant dépendant de la distance des charbons est suffisante pour vaincre l'action du ressort antagoniste R. Celui-ci agit non directement sur la branche P du levier F, mais sur un levier situé au-dessus et mobile en X. Quand

le courant a son intensité normale, la tige T est verticale, et les deux rouages, tous deux embrayés, sont immobiles. Le courant vient-il à s'affaiblir, F s'éloigne des pôles, la branche T s'incline vers la droite, et le volant o' est seul embrayé : c'est le rouage de gauche, déterminant le rapprochement des charbons, qui se met en mouvement. Le courant reprend progressivement sa force, le levier marche en sens contraire ; et si l'intensité dépasse une certaine limite, c'est-à-dire si les charbons se rapprochent plus qu'il n'est nécessaire, c'est le rouage produisant le recul qui se met en marche, pendant que l'autre est arrêté. A l'aide d'une vis qui agit sur le ressort R, on peut régler convenablement la tension de ce ressort, suivant l'intensité du courant employé. Enfin, en modifiant l'une des pièces du mécanisme, on peut rendre égales les vitesses des deux crayons, ou bien faire marcher le charbon positif deux fois plus rapidement que l'autre. Le régulateur peut donc fonctionner aussi bien avec une pile qu'avec une machine magnéto-électrique.

Le levier X qui agit sur la branche P de l'armature a sa face inférieure légèrement courbée, de sorte que le point où ce levier agit change de position : l'action du ressort est donc elle-même variable, et cela selon l'intensité du courant. Comme la courbure dont il s'agit est très-faible, il en résulte que les mouvements oscillatoires de l'armature sont eux-mêmes très-petits, et que le rapprochement ou le recul des charbons n'a lieu que par une gradation presque insensible. De là une constance remarquable dans l'intensité de la lumière.

Dans le *régulateur Serrin* (fig. 402), le porte-charbon supérieur AB porte une crémaillère qui engrène avec la roue dentée R ; par son propre poids, il tend à descendre, à faire descendre avec lui le charbon *c*, et à faire tourner la roue dentée. Sur l'axe de celle-ci, est calée une poulie G, qui, par une chaîne galle et une poulie de renvoi J, communique un mouvement ascendant à la tige KK portant le charbon inférieur. Ce mouvement a lieu toutes les fois que le courant ne passe pas, et amène ainsi les charbons au contact. Dès que le circuit est fermé et le courant

introduit dans l'appareil, l'électro-aimant E détermine l'attraction d'un cylindre de fer doux A ; ce dernier fait partie d'un quadrilatère oscillant TUSR qui s'abaisse avec l'armature, et fait descendre le tube porte-charbon KK avec lequel il est lié. Une pièce de forme triangulaire *d*, du système oscillant, vient alors buter contre l'une des palettes du moulinet d'encliquetage *ee*, ce qui produit l'arrêt du rouage. Les deux charbons se trouvent alors séparés, et il y a formation instantanée de l'arc voltaïque. La lampe à cet instant, commence à fonctionner.

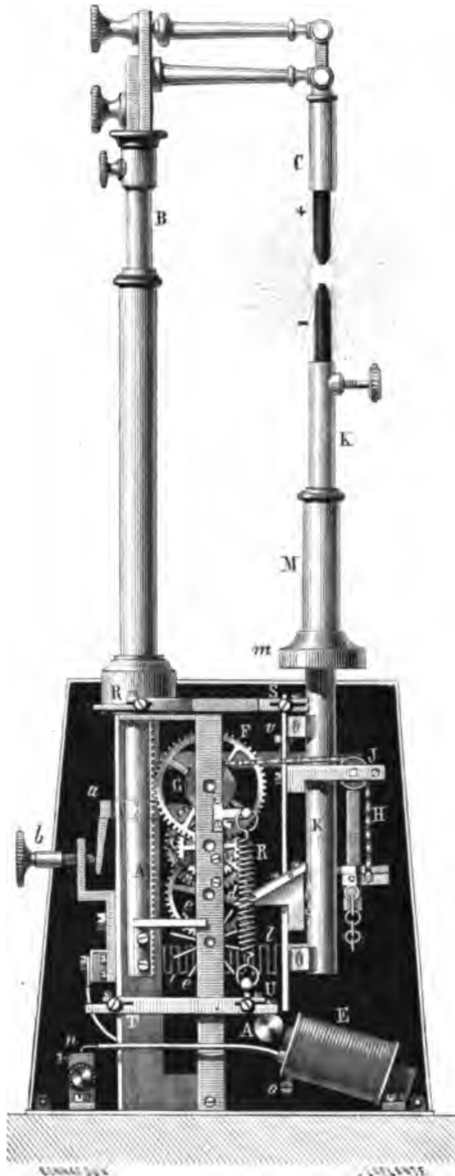


Fig. 402. — Régulateur de la lampe photo-électrique Serrin.

Mais peu à peu, les charbons se consumant, leur écartement augmente ; l'arc voltaïque croît en dimensions, et l'intensité du courant diminue par suite de l'accroissement de la résistance. Il résulte de là une aimantation moins énergique du fer doux de l'électro-aimant, et une moins forte attraction de l'armature A, qui cède à l'action des ressorts antagonistes tels que R. Le système oscillant remonte alors, entraîne vers le haut le cliquet *d*,

de sorte que le moulinet se trouve dégagé, et le rouage fonctionne à nouveau. De là un nouveau rapprochement des cônes de charbon, par suite intensité plus grande du courant, attraction de l'armature, et ainsi indéfiniment, jusqu'à ce que l'usure des charbons soit trop considérable et nécessite leur renouvellement. Le fonctionnement de la lampe et la durée de la lumière produite se trouvent ainsi assurés d'une façon continue, et ne dépendent plus que du choix convenable de la longueur des charbons, calculés pour le temps qu'on veut assigner à l'éclairage.

Le courant arrive par une borne au tube AB, passe du charbon supérieur au charbon inférieur, suit le tube KK, et, par une lame *l* à forme ondulée, entre dans la bobine de l'électro-aimant; de là il va au bouton *n*, qui communique lui-même avec le pôle négatif de la pile ou de la machine magnéto-électrique employée.

Ajoutons que les diamètres de la roue F et de la poulie G sont calculés de façon à avoir le même rapport que les chemins parcourus par les deux charbons, chemins inégaux, puisque l'usure des charbons est inégale, et qu'il importe de maintenir le point lumineux à une hauteur constante.

§ II — Phares électriques — Applications diverses de la lumière électrique

Une des plus importantes applications de la lumière électrique est certainement celle qui en a été faite à l'éclairage des phares. Les feux de premier ordre, grâce aux admirables appareils lenticulaires de Fresnel, ont, en temps ordinaire, une portée bien suffisante pour le service des côtes; mais il n'en est pas de même dans les nuits où l'atmosphère est brumeuse, et où précisément il y aurait le plus d'utilité et d'intérêt pour les marins d'être renseignés sur leurs routes. Augmenter le nombre des becs de lampes Carcel employées n'eût pas été une solu-

tion, car la portée ne dépend pas seulement du diamètre apparent de la lumière, mais de son éclat intrinsèque. L'emploi de la lumière électrique, dont l'intensité est si considérable, se trouvait naturellement indiqué; mais l'application n'en était pas possible avant qu'on eût trouvé un appareil régulateur convenable et des machines produisant une quantité de lumière assez grande. Les régulateurs tels que ceux de Foucault et de Serrin satisfaisaient à la première de ces conditions; les

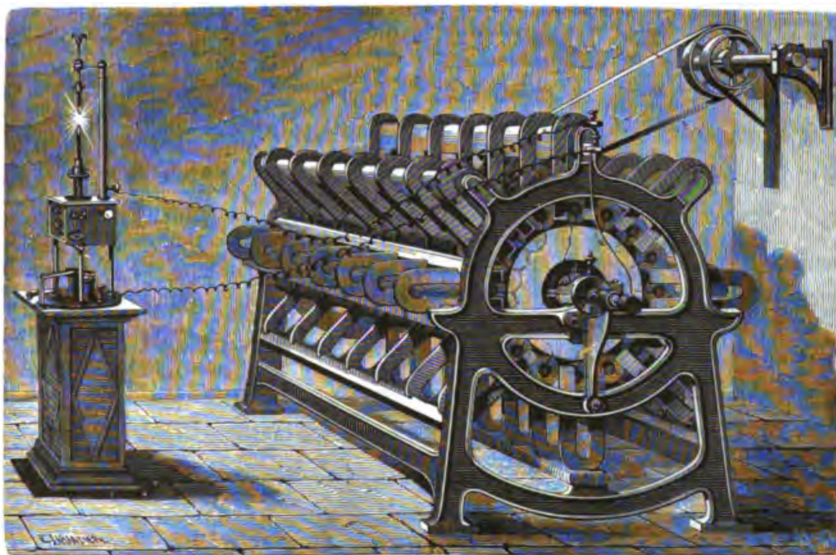


FIG. 403. — Machine magnéto-électrique de l'*Alliance*.

machines magnéto-électriques dont nous allons parler maintenant ont permis de satisfaire à la seconde. Ces machines ont été construites par une compagnie industrielle, *l'Alliance*, qui les a portées à un haut degré de puissance. La figure 403 représente un de ces appareils, tels qu'ils fonctionnent aux phares de la Hève, sur les côtes de la Manche.

Un bâti de fonte, très-solidement établi, porte, rangés comme les rayons d'autant de circonférences, plusieurs séries de huit aimants en fer à cheval, dont les pôles se trouvent disposés en regard des armatures de fer doux d'autant de bobines. Les huit

paires de bobines de chaque série d'aimants sont portées par des roues de bronze, et les extrémités de leurs fils viennent s'attacher sur des disques ou plateaux de bois calés sur les roues. Un même axe de rotation tourne dans des coussinets fixés au bâti, et entraîne dans son mouvement tous les disques et toutes les bobines, dont les armatures viennent ainsi passer rapidement devant les pôles des aimants. Il en résulte une succession indéfinie de courants induits qui, d'après la disposition adoptée, sont tous de même sens, et, réunis, forment une source, pour ainsi dire, continue d'électricité. En recueillant cette électricité à l'aide de deux fils qui vont aboutir aux tiges des cônes de charbon d'une lampe électrique, on obtient un jet de lumière d'une intensité considérable.

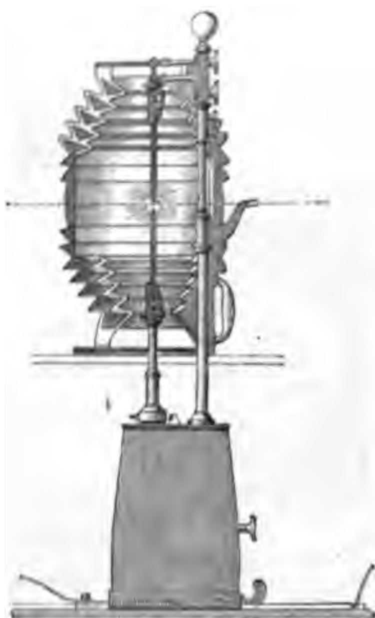


Fig. 404. — Appareil photo-électrique du phare de la Hève.

Les machines magnéto-électriques des phares de la Hève sont mises en mouvement par deux machines à vapeur dont la force est de 5 chevaux. Avec une vitesse de rotation de quatre cents tours par minute, on obtient le maximum de l'intensité lumineuse. La lumière renvoyée à l'horizon, c'est-à-dire prise au dehors de l'appareil lenticulaire, produite par une machine à quatre disques, équivaut à 3500 becs de lampes Carcel; avec une machine à six disques, on obtient l'effet de 5000 lampes, et la portée du feu est de 27 milles marins, ou de 50 kilomètres. Cette puissante source de lumière résulte donc de l'association des courants d'induction qui naissent de l'action instantanée de 48 aimants sur les 96 bobines en mouvement dans chaque machine magnéto-électrique.

Quatre machines semblables fonctionnent dans les phares de la Hève. Tous les appareils s'y trouvent en double, afin que la substitution immédiate d'une lampe à une autre ne laisse aucune discontinuité dans les feux. Les lampes sont installées sur les rails de petits chemins de fer qui viennent aboutir aux centres des deux appareils lenticulaires fixés l'un au-dessus de l'autre dans la même lanterne. Les régulateurs employés sont ceux du système Serrin. Ce nouveau mode d'éclairage des phares a été adopté récemment sur le parcours du canal maritime de Suez.

Non-seulement la lumière électrique fournie par les machines de la compagnie *l'Alliance*, construites par M. Van Malderen, surpasse en intensité celle des appareils éclairés à l'huile au moins dans le rapport de 5 à 1, mais encore elle est plus économique[1]. Tandis qu'un phare à feu fixe du premier ordre nécessite une dépense de 3 fr. 70 cent. par heure, un phare électrique tel que ceux de la Hève ne coûte que 2 fr. 79 cent. (machine à 4 disques); à intensité égale, le prix de revient est 7 fois moindre. Mais il s'agit ici d'un service qui ne permet aucune interruption; dans l'industrie, le prix de revient serait certainement bien moindre, pourvu toutefois que l'emploi de la lumière fût chaque jour au moins d'une dizaine d'heures. Dans le cas où, en outre, la force motrice pourrait être empruntée à de puissantes machines fonctionnant pour d'autres besoins, comme dans beaucoup d'usines, la lumière électrique, ainsi que le fait remarquer M. Le Roux[2], coûterait à peine plus que l'amortissement du prix de la machine magnéto-électrique et du régulateur.

La lumière électrique a été appliquée à l'éclairage des navires. Expérimentée sur des navires français, américains

1. M. Van Malderen vient de construire de nouvelles machines à quatre disques plus puissantes, à vitesse égale, que les machines à six disques : elles donnent 230 becs Carcel au lieu de 180.

2. *Les machines magnéto-électriques françaises et l'application de l'électricité à l'éclairage des phares*, deux leçons faites à la Société d'encouragement pour l'industrie nationale.

autrichiens, elle a donné d'excellents résultats; mais nous ne sachions pas que cette application, qui pourrait être utile pour éviter les collisions en mer aujourd'hui si fréquentes, et qui rendrait également des services dans mille autres cas, soit passée du domaine des essais dans celui de la pratique.

L'éclairage des galeries de mines par l'électricité a aussi parfaitement réussi. Des expériences ont été faites pendant



Fig. 405. — La lumière électrique appliquée aux travaux de nuit.

dix-sept jours et dix-sept nuits aux ardoisières d'Angers, sous la direction de M. Bazin, et elles ont donné d'excellents résultats.

N'oublions pas l'emploi de ce puissant moyen d'éclairage pour les travaux de nuit. La première tentative de ce genre date de la reconstruction du pont Notre-Dame, à Paris; depuis, on a utilisé la lumière électrique pour les travaux des docks, pour ceux du nouveau Louvre, du pont de Kehl.

D'autres essais moins heureux sont ceux qu'on a faits en vue de l'éclairage public des grandes villes. On a cherché d'abord

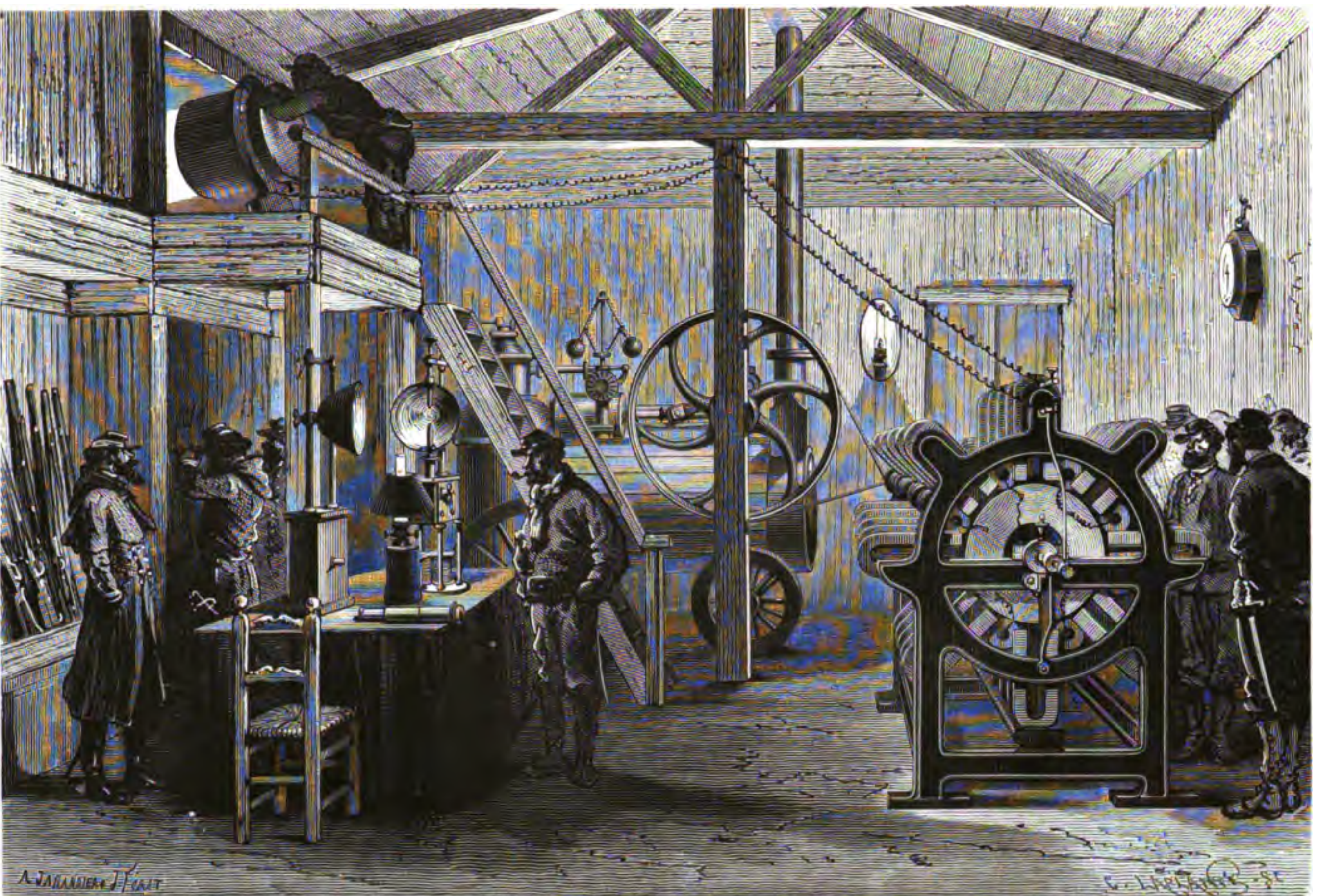


PLANCHE XXIII — LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE PENDANT LE SIÉGE DE PARIS

POSTE DE LA BUTTE MONTMARTRE

à remplacer les lumières multipliées des becs de gaz sur les places, les quais, les boulevards, par un foyer puissant de lumière électrique, dont les rayons étaient projetés par des appareils réflecteurs sur le vaste espace qu'il s'agissait d'illuminer. L'effet a été éblouissant, mais désastreux; et l'on devait s'y attendre. La lumière électrique se distingue, en effet, par une intensité excessive; mais précisément pour cela, les regards n'en peuvent supporter l'éclat; elle est d'autant plus fatigante, qu'elle est pauvre en rayons rouges, ce qui la rend en même temps blafarde et donne aux objets éclairés une teinte sinistre : c'est l'effet produit par les éclairs orageux dans les nuits très-sombres. Un autre grave inconvénient vient de cette circonstance, qu'un foyer unique remplace une multitude de points lumineux, d'où résulte un contraste choquant entre la vive lumière des objets éclairés et les ombres noires et crues de leurs parties non éclairées. En un mot, la lumière n'est point, par ce système, diffusée de tous côtés; la substitution qu'on a essayée de plusieurs foyers à un seul n'a fait qu'atténuer ces inconvénients sans les détruire [1].

Mais si la lumière électrique ne paraît pas pouvoir être appliquée à l'éclairage public dans les circonstances normales, elle peut, au contraire, être avantageusement employée dans les fêtes, dans les théâtres, toutes les fois, en un mot, qu'il s'agit de produire des effets singuliers, bizarres, ou d'imiter certains phénomènes naturels. Dans les opéras du *Prophète*, de *Moïse*, la lumière électrique a été utilisée pour représenter le lever du soleil, un incendie, pour figurer un arc-en-ciel, les rayons de lumière qui illuminent le personnage de Moïse. Dans les fêtes qui ont été données cette année même (1873) à l'occasion de la visite du shah de Perse, on s'est servi de la lumière électrique pour produire certains effets d'illumination qui ont été fort remarqués.

1. Cette action énervante des rayons de la partie la plus réfrangible du spectre ne tiendrait-elle point à l'extrême rapidité des ondulations de l'éther qui les produisent, lesquelles ébranlent la rétine et le nerf optique avec une excessive énergie?

Mais une application plus sérieuse et plus utile, est celle qu'on a faite de la lumière électrique pendant le siége de Paris, pour les reconnaissances des travaux ou des opérations nocturnes de l'ennemi. Des appareils ont été installés dans ce but, notamment au Mont-Valérien et à la butte Montmartre. Dans ce dernier poste, la lumière était produite par une machine magnéto-électrique de l'*Alliance*. Un réflecteur parabolique, ayant son foyer au point même où les cônes de charbon produisaient la lumière, projetait au loin le faisceau, dans une direction qu'on pouvait faire varier à volonté, selon les ordres des officiers chargés de ces reconnaissances. Les deux planches XXIII et XXIV montrent, la première quelle était l'installation des appareils électriques et optiques la seconde l'effet produit dans une circonstance particulière, celle où les Prussiens tentaient le passage de la Seine à Chatou.

Le même système d'éclairage peut s'appliquer à la marine. Les machines électriques sont installées sur le pont, et l'appareil optique ou le fanal se place au haut de l'un des mâts. De cette façon, le navire explorateur peut, sans être vu, fouiller l'horizon, éblouir de sa lumière un navire ennemi, et ce dernier, plongé dans les feux ainsi projetés, ne peut juger d'où ils proviennent.

Nous aurons terminé ce que nous avions à dire de la lumière électrique et de ses applications, en rappelant ce que nous avons déjà dit ailleurs de l'emploi avantageux qu'on en a fait aux projections microscopiques; puis de son usage en photographie : dans ces deux cas, la lumière électrique supplée ainsi à l'absence du soleil. Nous dirons aussi un mot des lampes photo-électriques inventées pour l'éclairage des mines, et qui sont en même temps des lampes de sûreté. La lumière produite dans ces appareils n'est plus l'arc voltaïque jaillissant entre deux cônes de charbon : il n'est pas nécessaire, dans ce cas, d'une intensité aussi considérable.

L'étincelle d'induction, telle que nous l'avons vue se produire dans un milieu raréfié ou dans le vide, donne une lumière assez

[illegible] LUMIÈRE [illegible]

[illegible]

faible, mais suffisante cependant pour l'éclairage des mines. On



FIG. 406. — Lampe photo-électrique des mineurs, système Dumas et Benoît.

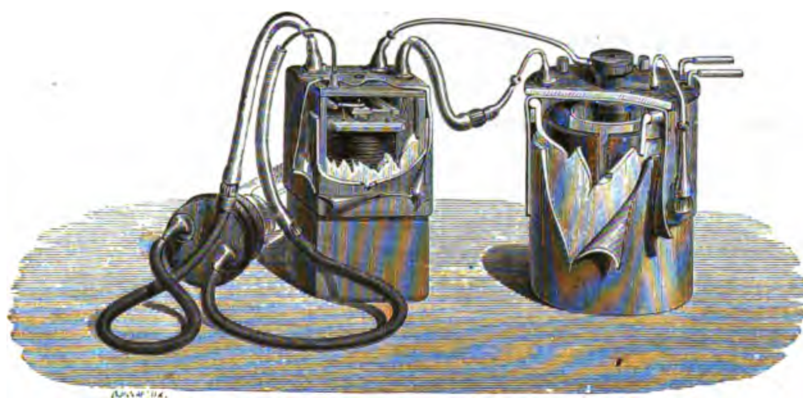


FIG. 407. — Appareil électro-magnétique de la lampe des minenrs.

l'a donc utilisée pour construire des lampes de sûreté, dont la figure 406 donne un échantillon.

Un tube capillaire contourné en spirale est placé dans un

cylindre de verre ; deux fils de platine communiquant avec la bobine sont mastiqués aux deux extrémités, et c'est entre eux que se font les décharges successives, comme dans les tubes de Geisler. La lampe est attachée à une boîte qui porte l'appareil d'induction et la pile (fig. 407).

Ce système d'éclairage met les mineurs à l'abri de tout danger. En effet, la gerbe lumineuse se produit dans le vide, sans aucune communication avec l'air contenu dans le verre cylindrique et, à plus forte raison, avec l'air de la mine ; d'ailleurs, si l'appareil vient à se briser, la rentrée de l'air détruit brusquement l'étincelle, et avec l'extinction de la lumière tout danger d'inflammation disparaît.

§ III — Inflammation des mines

L'explosion des fourneaux de mines par les anciens procédés est une opération souvent dangereuse, et les accidents qu'elle cause de temps à autre sont malheureusement trop graves pour qu'on n'ait pas songé à les prévenir. Pour enflammer la poudre enfermée dans ces fourneaux, voici comme on procédait. On faisait communiquer l'intérieur de la mine à des traînées de poudre plus ou moins longues déposées à la surface du sol, par des tubes de toile pleins de poudre, et que, dans le langage technique, on nomme des *saucissons*. Puis, à l'extrémité de la traînée, on mettait en contact avec elle un long morceau d'amadou qu'on allumait par le bout opposé, les dimensions de cette amorce étant calculées pour que l'ouvrier chargé de cette opération eût le temps de s'éloigner. Inutile d'insister sur le danger qui résultait d'une inflammation trop prompte : souvent c'est le retard subi par cette inflammation qui était cause des accidents, surtout si l'on faisait sauter à la fois plusieurs mines, si l'on ignorait quelles étaient celles qui n'avaient pas fait explosion,

ou enfin si l'on croyait éteintes des mèches qui, en réalité, ne l'étaient point.

En se servant des courants, de l'étincelle qui jaillit au moment où l'on ferme le circuit à distance, tout danger devait disparaître et a disparu en effet. On emploie dans ce but, tantôt la

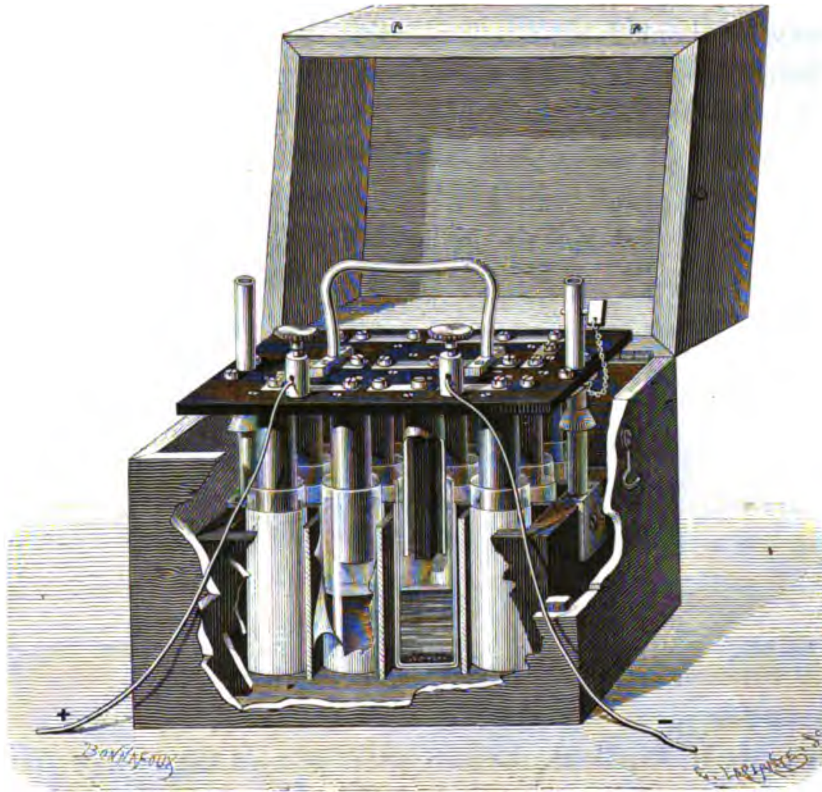


FIG. 408. — Pile au bichromate de potasse pour l'inflammation des mines.

pile, tantôt la bobine d'induction de Ruhmkorff, ou encore les courants induits des machines magnéto-électriques.

Dès l'origine de cette nouvelle application de l'électricité, on s'est servi de la pile. Mais il faut une pile puissante et des conducteurs métalliques d'un gros diamètre. Une spirale de platine noyée dans la poudre est portée à l'incandescence dès que le circuit est fermé, et l'explosion a lieu. On se sert maintenant

d'une batterie composée d'éléments au bichromate de potasse, renfermés dans une caisse et disposés de manière qu'un mécanisme fort simple fait plonger à la fois tous les zincs dans le liquide. Ce procédé, qui avait été abandonné pour ceux que nous allons décrire, a été repris depuis quelques années et perfectionné.

C'est dans les grands travaux du port de Cherbourg qu'a été inaugurée la méthode d'inflammation des mines par l'étincelle d'induction de la bobine de Ruhmkorff. Cette méthode, pro-



Fig. 409. — Fusée Statcham pour l'inflammation des mines.

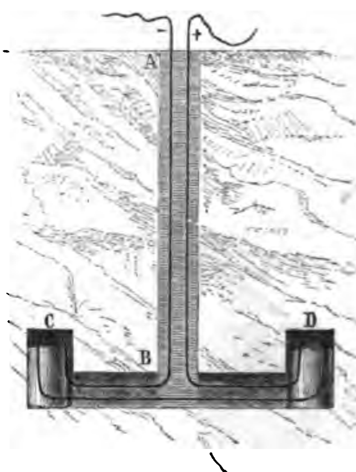


Fig. 410. — Fourneaux de mines.

posée par M. Du Montcel, ne réussit pas d'abord, le pouvoir calorifique de l'étincelle, à la distance où devait se faire l'explosion, n'étant pas assez grand pour enflammer la poudre. Heureusement, un ingénieur anglais, M. Stateham, venait d'inventer une fusée douée d'une inflammabilité beaucoup plus grande que celle des fusées ordinaires; M. Ruhmkorff adopta ce nouvel engin, et le succès répondit complétement à son attente. Voici en quoi consiste ce nouveau genre de fusée.

Ce sont deux bouts de fil de cuivre rouge, enveloppés d'une couche de gutta-percha, et dont les extrémités libres A, B, sont, après avoir été recourbées, introduites dans une sorte de cap-

sule de gutta-percha vulcanisée [1]. Les deux bouts viennent aboutir à 1 ou 2 millimètres de distance, dans une sorte de boîte CD qu'on remplit de poudre après avoir enduit les pointes du fil de fulminate de mercure. « Les premiers essais en grand, dit M. Du Moncel, de l'application de l'appareil d'induction de Ruhmkorff aux mines, ont été faits, en 1853, par le colonel espagnol Verdu, dans les ateliers de M. Herkmann, fabricant de fil recouvert de gutta-percha, à la Villette. On a expérimenté successivement sur des longueurs de fil de 400 mètres, de 600, 1000, 4800, 5000, 6400, 7600, 25000, 26000 mètres, et le succès a toujours été complet, soit avec un circuit composé de deux fils, soit en faisant entrer la terre dans le circuit. On n'avait employé, pour cela, que 2 éléments de Bunsen. » (*Exposé des applications de l'électricité*, t. III.)

Pour faire éclater des mines monstres, c'est-à-dire chargées de centaines ou de milliers de kilogrammes de poudre, logées dans plusieurs cavités reliées entre elles, et obtenir leur explosion presque simultanée, on se sert d'un commutateur dont la touche est successivement mise en contact avec des lames de cuivre reliées avec chaque fourneau. Les explosions ont ainsi lieu l'une après l'autre, mais à intervalles si rapprochés, qu'on pourrait les croire simultanées.

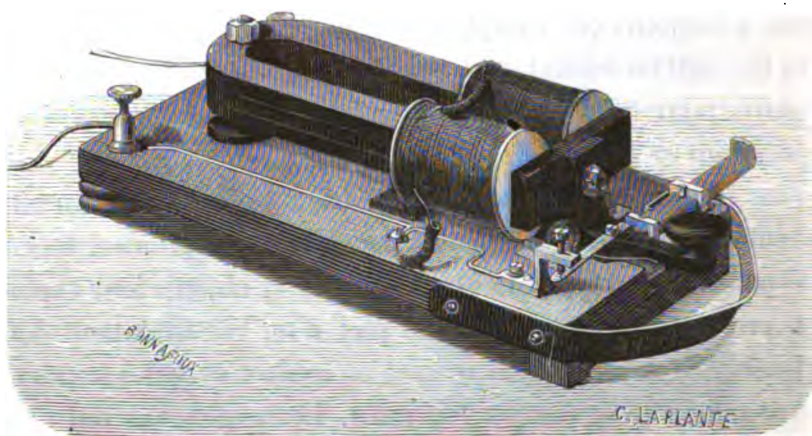
L'emploi de l'électricité pour l'inflammation des mines n'est pas seulement avantageux au point de vue de la sécurité; il offre aussi, par la facilité qu'il donne de produire des effets mécaniques gigantesques dus à la simultanéité des explosions, une économie considérable (jusqu'à 60 pour 100) sur l'ancien procédé des traînées. En 1854, dans les travaux de creusement d'un bassin au port de Cherbourg, il suffit de l'explosion de six mines pour détacher d'un coup un bloc de 50000 mètres cubes de rocher.

Voici maintenant un appareil exploseur dont la puissance

1. C'est-à-dire combinée avec du soufre. Le contact avec un fil de cuivre détermine un dépôt de sulfure très-inflammable.

calorifique est due au développement des courants induits et de l'extra-courant magnéto-électrique. L'invention en est due à M. Bréguet.

Un électro-aimant a ses pôles en regard de deux faisceaux aimantés énergiques en fer à cheval, disposés de manière à avoir leurs pôles tournés en sens contraires. Il en résulte, dans le fer à cheval de l'électro-aimant, une aimantation qu'on rend plus forte au moyen d'une armature fixe. En avant de celle-ci, est une pièce de fer doux, maintenue au contact de l'armature par



F.G. 411. — Exploseur magnétique pour l'inflammation des mines, système Bréguet.

un ressort antagoniste, et qui peut en être séparée brusquement par le mouvement rapide imprimé au bouton d'une poignée. Cet éloignement, par la diminution de force qui en résulte dans l'armature de l'électro-aimant, donne naissance à un courant induit dans les fils des bobines, et en outre à un extra-courant, dont l'intensité s'ajoute à celle du courant induit. C'est surtout la puissance de l'extra-courant qui est utilisée pour la production de l'étincelle, et M. Bréguet a imaginé une disposition permettant d'employer cette puissance au moment précis où elle acquiert sa valeur maximum. Dans ce but, une lame de ressort, en contact avec une vis, ne s'en sépare qu'à la fin du mouvement de la pièce de fer doux. Or, les fils des bobines

de l'électro-aimant aboutissent, l'un à la vis, l'autre au ressort, de sorte que, tant que le contact dure, le circuit reste fermé sur lui-même, et l'extra-courant arrive à son maximum quand le contact cesse ; alors la décharge se fait à travers le circuit aboutissant à la mine.

Pour éviter les accidents, quand l'appareil est mis en communication avec plusieurs mines, un verrou empêche la bascule de la poignée ; celle-ci ne peut fonctionner que quand, tout étant prêt, le verrou est tiré. On peut alors, sans crainte, donner le signal.



Fig. 412. — Fanal de M. Trève pour la télégraphie nautique nocturne.

Les appareils que nous venons de décrire peuvent être et sont en effet employés, non-seulement pour faire sauter les mines, mais pour produire à distance toute inflammation d'engins dangereux, ou de matières gazeuses telles que le grisou, ou enfin simplement pour l'allumage de becs de gaz qui doivent servir de signaux. Un officier de marine, M. Trève, a proposé l'adoption, dans la flotte, d'un télégraphe nautique destiné à remplacer les signaux de nuit qui, comme on sait, se font à l'aide des fanaux de combat. Ces fanaux consistent en lanternes munies de lentilles à échelons semblables aux lentilles des phares, qu'on hisse sur une ou deux drisses au point le plus élevé du navire. L'allumage et la manœuvre nécessaires pour la mise en place de ces fanaux prennent beaucoup de temps. M. Trève a proposé de rendre ce mode de communication beaucoup plus prompt, en remplaçant les bougies des lanternes par le gaz d'éclairage, et en fixant les fanaux à la place qu'ils doivent occuper. Des tuyaux de plomb ou de caoutchouc, partant d'un réservoir de gaz situé sur la dunette, vont aboutir aux fanaux ; en ouvrant ou fermant un robinet, on peut fournir à l'un ou à l'autre le gaz nécessaire. Un appareil d'induction, une bobine de Ruhmkorff, par exemple, fonctionnant à ce moment, la

lumière est distribuée à ceux des fanaux dont les robinets sont ouverts, et le commandant, de sa cabine, peut aisément faire faire tous les signaux que comporte ce mode de télégraphie nocturne.

L'inflammation à distance des matières explosives par l'électricité sert encore à la protection des ports et des abords des places fortes. Tout le monde a entendu parler de ces engins formidables qu'on a nommés des *torpilles*, et dont l'explosion est si terrible, qu'une seule, si elle se fait à propos, peut faire couler le plus grand navire de guerre. Les torpilles ont joué un rôle important dans la guerre de la sécession aux États-Unis: un assez grand nombre de navires leur ont dû leur perte. Voici comment était disposée la torpille (*torpedo*) américaine.

L'engin dont il s'agit était une caisse d'étain dont la capacité atteignait jusqu'à 45 ou 50 litres, et qui était divisée en deux parties par une cloison transversale : l'une des parties recevait la charge de poudre, l'autre servait de chambre à air. Une verge de fer, noyée dans la poudre et coiffée d'une capsule, recevait le choc d'un marteau, quand un navire, en passant au-dessus du point où la torpille était immergée, touchait un flotteur muni d'une corde en communication avec l'encliquetage du marteau.

L'explosion n'était donc pas primitivement produite par l'électricité. Mais on songea bientôt aux avantages pouvant résulter d'une inflammation à distance, et qui restait à la volonté des autorités chargées de la défense. L'ex-ministre de la guerre en Belgique, le général Chazal, a combiné l'emploi de l'électricité avec celui de la chambre noire, d'une façon très-ingénieuse pour la défense de l'Escaut par les torpilles.

Sous une tente protégée par un terre-plein, se trouve disposée la pile ou l'appareil d'induction qui détermine la production de l'étincelle. Là aboutissent séparément tous les fils qui relient électriquement les lignes de torpilles à l'appareil, et chacun d'eux est numéroté, de façon à rendre toute erreur impossible.

Sur une table est placé un plan de l'Escaut, où les positions des lignes de torpilles sont indiquées, et qui n'est autre chose que la reproduction de la projection optique du fleuve par l'appareil de la chambre noire disposé au sommet de la tente. Supposons qu'un navire ennemi soit aperçu remontant le fleuve. L'officier chargé de la surveillance et du commande-

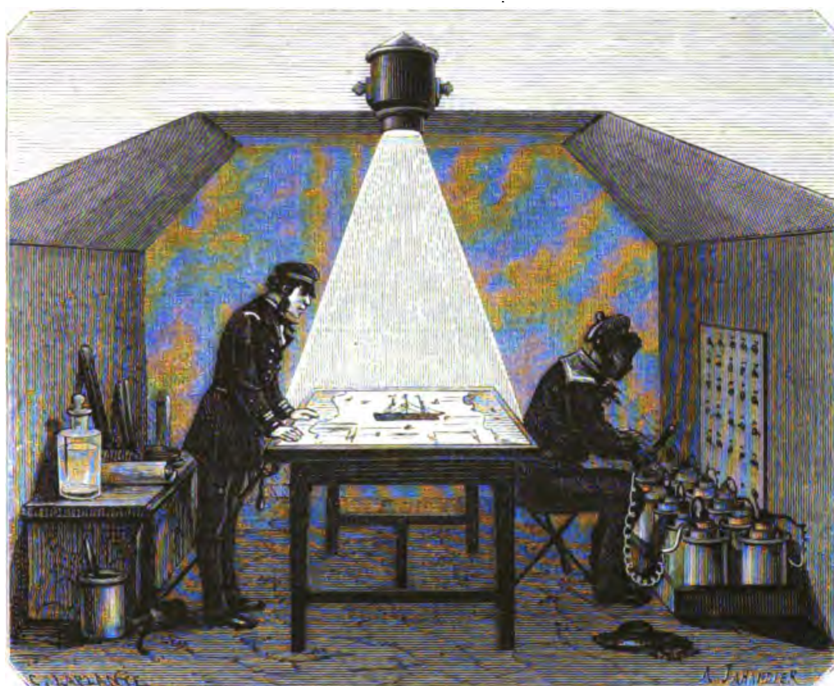


Fig. 413. — Explosion des torpilles par l'électricité; système de défense des ports et des côtes du général Chazal.

ment pourra suivre de minute en minute la position qu'il occupe relativement aux lignes d'immersion des torpilles. Au moment opportun, il donnera l'ordre au marin chargé de l'appareil électrique, et indiquera le numéro du fil dont celui-ci doit fermer le circuit. Aussitôt l'explosion aura lieu. Des expériences faites il y a quelques années ont été, paraît-il, couronnées de succès.

Paris, pendant le siége, eut les abords de ses remparts et de ses forts protégés par un réseau de torpilles. Mais aucune attaque de vive force n'ayant eu lieu contre la grande cité, de la part de l'armée assiégeante, ce système de défense, d'ailleurs parfaitement organisé, n'a joué nécessairement qu'un rôle préventif.

CHAPITRE IX

LA GALVANOPLASTIE

---

§ I — Résumé historique

Nous avons vu l'électricité transmettre à distance, avec une rapidité prodigieuse et sous les formes les plus variées, les signaux confiés aux appareils de télégraphie, tantôt se bornant à de simples mouvements oscillatoires des aiguilles du galvanomètre, tantôt écrivant, imprimant même en caractères connus les lettres d'une dépêche, tantôt enfin reproduisant avec une fidélité incroyable le *fac-simile* de l'écriture ou du dessin constituant le message expédié. La télégraphie est donc une application mécanique de l'électricité ou mieux de l'électro-magnétisme, puisque le principe est l'action réciproque des courants voltaïques et des aimants. C'est encore en utilisant les répulsions et les attractions électro-magnétiques, qu'on a inventé l'horlogerie électrique, les chronographes, les enregistreurs automatiques des phénomènes physiques, les moteurs électriques, et une foule d'appareils aujourd'hui employés dans les industries et les arts les plus divers.

L'électricité ne produit pas seulement du mouvement; elle échauffe les corps, et cela d'une façon si énergique, qu'elle fond

et volatilise les métaux et les substances les plus réfractaires; qu'elle enflamme à distance les fusées des mines, les torpilles protectrices des côtes et des ports. La lumière éblouissante qui se dégage entre les deux cônes de charbon rivalise d'intensité avec les rayons solaires. Grâce à un mécanisme dont le mouvement est réglé par les variations d'intensité du courant et par la combustion même, la lumière de l'arc voltaïque a pu être aussi utilisée dans maintes applications : dès maintenant elle perce les brumes pendant les nuits les plus obscures, et les phares, dont l'invention de Fresnel avait fait de si puissants auxiliaires de la navigation, ont vu accroître encore leur éclat et leur portée.

Il nous reste, pour compléter ce tableau des applications de l'électricité, à rendre compte de celles qui sont basées sur les effets chimiques des courants, c'est-à-dire sur les phénomènes encore mystérieux qu'on s'accorde à regarder dans la science comme les générateurs mêmes de l'électricité dynamique.

La *galvanoplastie*, l'*électro-chimie*, sont les noms sous lesquels on range habituellement ces applications dont la science, l'industrie et l'art ont également su faire leur profit. Un mot sur leur principe commun suffira pour justifier la distinction que nous venons de faire.

Rappelons d'abord les phénomènes qui se produisent, quand on fait passer un courant voltaïque au travers d'une dissolution saline. Prenons pour exemple une dissolution de sulfate de cuivre. Sitôt que le circuit est fermé et que le courant se produit, la décomposition du sel a lieu : des bulles d'oxygène se dégagent autour de l'électrode positive; du cuivre se dépose à l'état métallique autour de la lame qui forme l'électrode négative. Ce phénomène de décomposition était déjà connu des physiciens qui n'avaient à leur disposition que les premières piles de Volta; seulement, à cause de l'irrégularité du courant, de son affaiblissement rapide, le dépôt métallique n'était le plus souvent qu'un dépôt pulvérulent, impropre aux applications industrielles. La science en fit toutefois son profit, et les

chimistes parvinrent ainsi à isoler, à découvrir des métaux jusqu'alors inconnus. L'invention des piles à courant constant, de la pile de Daniell par exemple, modifia d'une façon heureuse le phénomène. Nous avons eu plus haut l'occasion de citer la découverte du premier moteur électrique, de celui qu'imagina Jacobi pour faire mouvoir une barque sur la Néva. Si cette invention n'eut pas le succès qu'en espérait son auteur, elle fut l'occasion d'une découverte plus heureuse d'où est née en définitive la galvanoplastie.

Jacobi, qui avait employé pour son expérience une pile de Daniell dont le pôle positif était formé de lames de cuivre très-pur, très-malléable, fut étonné de voir que des lames de platine de l'électrode négative s'étaient recouvertes d'un dépôt rugueux, formé de petites lamelles de cuivre cassantes, et dont la surface interne reproduisait fidèlement toutes les inégalités du métal sur lequel elles s'étaient formées. L'illustre physicien recommença, en la variant, la même expérience ; il obtint des dépôts métalliques homogènes, et qui, au lieu d'être pulvérulents, avaient toute la consistance, la compacité, la ductilité des métaux les plus purs, tels que les fournissent les opérations métallurgiques. De plus, en remplaçant la lame de cuivre de la pile par des moules de médailles, de planches gravées en relief ou en creux, il obtint des reproductions fidèles en creux ou en relief des types originaux. Telle est l'origine de la galvanoplastie, qu'un savant anglais, M. Spencer, découvrait d'ailleurs de son côté l'année suivante. Bientôt cette invention prit un grand développement ; ce fut le point de départ de nombreuses applications artistiques et industrielles, et l'objet de perfectionnements importants.

Les procédés qui constituent la galvanoplastie proprement dite donnent des dépôts qui se moulent exactement sur les objets à reproduire, mais sans y adhérer. Mais on peut aussi obtenir des dépôts très-minces, qui adhèrent à la surface de l'objet et lui servent de couche protectrice, sans en altérer sensiblement les contours, ni la forme : les procédés employés dans ce cas constituent la dorure, l'argenture, le cuivrage... galvaniques,

selon que le métal déposé est l'or, l'argent, le cuivre, etc. Telle est, quant au résultat, la différence qui existe entre la galvanoplastie et ce qu'on nomme quelquefois l'électro-chimie, la galvanisation. Le principe est le même, les procédés sont différents: de plus, comme on va le voir, ils ont été découverts d'une façon indépendante. L'invention de la dorure galvanique remonte, en effet, à une date bien plus éloignée que la galvanoplastie.

Dès 1805, un professeur de chimie à l'université de Pavie, Louis Brugnatelli, découvrait le moyen de dorer les médailles et les petits objets d'argent, à l'aide de la pile. Il se servait d'une dissolution de chlorure d'or dans l'ammoniaque (ammoniure d'or), dans laquelle était plongé l'objet à dorer, et faisait communiquer ce dernier par un fil d'acier ou d'argent au pôle négatif d'une pile. Mais cette invention resta inconnue et inappliquée. En 1840, M. de la Rive, l'illustre physicien de l'Académie de Genève, après de longues recherches faites dans le but de soustraire les ouvriers doreurs aux dangers de l'emploi du mercure, parvint à dorer le laiton, le cuivre et l'argent au moyen de la pile. La dissolution qu'il employait était « une solution de chlorure d'or aussi neutre que possible et très-étendue (de 5 à 10 milligrammes d'or par centimètre cube), dans un sac cylindrique formé d'une membrane de vessie; ce diaphragme est plongé dans un vase de verre contenant de l'eau convenablement acidulée, et il baigne lui-même dans la dissolution d'or ». Un cylindre de zinc uni par un fil d'argent à l'objet à dorer déterminait la production du courant électrique, qui devait être très-faible. Divers perfectionnements furent apportés au procédé de M. de la Rive par plusieurs savants, MM. Elsner, Bœttger, Perrot, Smee; mais bientôt une méthode nouvelle, presque simultanément découverte par un Anglais, M. Elkington (septembre 1840), et un Français, M. de Ruolz (1841), vint donner à cette application de l'électro-chimie une impulsion féconde. La galvanoplastie, à partir de ce moment, devint un véritable art industriel entre les mains de M. Christofle, qui acquit les brevets des deux inventeurs.

Sans entrer dans l'histoire détaillée des phases par lesquelles est passée la galvanoplastie depuis trente ans, décrivons les divers procédés tels qu'ils sont généralement employés aujourd'hui.

§ II — La Galvanoplastie proprement dite

Occupons-nous d'abord de la *galvanoplastie proprement dite*, de l'art qui permet de reproduire par un dépôt métallique homogène, mais non adhérent et suffisamment épais, le relief d'un objet quelconque, médailles, statues, bas-reliefs, ornements architecturaux, bijoux, etc.

Selon le but qu'on se propose, la reproduction galvanoplastique d'un objet peut se faire de deux manières différentes. Veut-on obtenir une reproduction identique, où le relief et les creux soient ceux du modèle même, il faut en ce cas commencer par faire un moule dont les creux seront les reliefs du modèle, et réciproquement : les procédés ordinaires du moulage sont ceux qu'on emploie alors ; mais il est clair qu'on pourrait obtenir d'abord le moule à l'aide de la galvanoplastie, puis, par une seconde opération faite avec cette contre-épreuve, reproduire l'objet. La première de ces opérations suffira, si c'est une reproduction en creux des reliefs du modèle qu'on se propose de faire.

Dans tous les cas, la surface du moule sur laquelle le courant viendra déposer le métal voulu devra être bonne conductrice de l'électricité : c'est ce qui arrivera si le moule est métallique. Si, comme cela a lieu le plus souvent dans la pratique, le moule est de cire, de soufre, de plâtre, ou mieux de gélatine ou de gutta-percha, il faudra préalablement en *métalliser* la surface. On y parvient de plusieurs manières. Le procédé le plus simple consiste à recouvrir le moule, à l'aide d'un pinceau ou d'une brosse, d'une couche mince et uniforme de poudre de plombagine : c'est à M. Jacobi qu'est dû ce moyen de rendre le

moule bon conducteur. On peut aussi se servir d'une solution de nitrate d'argent dans l'alcool. On expose la surface ainsi humectée du moule aux émanations de l'acide sulfhydrique : il se forme alors une couche noire, extrêmement mince, de sulfure d'argent, et ce dernier composé est un excellent conducteur. Ce second moyen est employé surtout quand on veut reproduire des objets délicats, des fleurs, des fruits, ou encore des objets de verre, de cristal.



FIG. 414. — Appareil simple pour la galvanoplastie.

Le moule obtenu et prêt à recevoir le dépôt métallique, il faut préparer le bain et l'appareil galvanoplastique. Ce qu'on nomme l'*appareil simple* consiste précisément dans le bain lui-même, qui constitue, à vrai dire, une pile à courant constant, telle que celle de Daniell. Supposons qu'il s'agisse de reproduire un objet en cuivre, c'est le métal le plus fréquemment employé. On met dans une cuve, dans un vase de verre, une dissolution de sulfate de cuivre (c'est la substance connue dans le commerce sous le nom de *couperose bleue*). Au centre de la cuve, on place un vase poreux rempli lui-même d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, et dans lequel plonge une lame ou un cylindre de zinc formant le pôle négatif de la pile. C'est à ce pôle qu'on

suspend par un fil métallique, qui l'enveloppe de manière à être en contact avec la couche conductrice (plombagine ou sulfure d'argent), le moule de l'objet à reproduire. La figure 414 montre comment on dispose l'appareil, qui sert également à la dorure et à l'argenture électro-chimiques. Dans ce cas, la nature du bain varie, ainsi que nous le verrons bientôt.

L'appareil simple n'est donc autre chose qu'une pile, dans laquelle le moule et le zinc forment le pôle négatif, tandis que la solution de sulfate de cuivre est le pôle positif : le fil métallique de suspension réunit les deux électrodes.

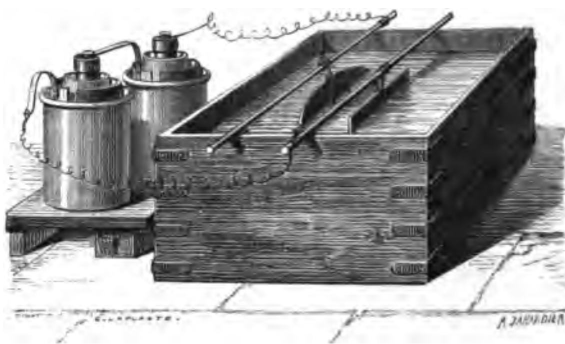


FIG. 415. — Appareil composé pour la galvanoplastie.

Dès que le courant est établi, le sulfate de cuivre est décomposé, et le dépôt du métal se fait sur toute la surface du moule. Mais à mesure que ce dépôt se forme, le bain s'appauvrit par cela même, devient de plus en plus acide, et le métal déposé perdrait ses propriétés plastiques, sa cohérence, si la solution n'était maintenue à son état normal de saturation par des cristaux de sulfate de cuivre qu'on place dans le bain, à l'intérieur d'un sac.

Ce qu'on nomme, en galvanoplastie, l'*appareil composé*, ne diffère de l'appareil simple qu'en ce que la pile est extérieure au bain ; pour empêcher le bain de s'appauvrir, on y maintient plongée une lame de cuivre, qu'on fait communiquer avec le pôle positif de la pile, tandis que le moule est relié métallique-

ment au pôle négatif. Cette lame rend incessamment à la solution la quantité de cuivre qui se dépose, de sorte que la concentration du bain reste constante. Jacobi, à qui l'on doit cette dernière disposition, a donné à la lame de cuivre de l'appareil composé le nom d'*électrode soluble*.

Entrons maintenant dans quelques détails sur les diverses applications industrielles ou artistiques de la galvanoplastie.



FIG. 416. — Reproduction d'une médaille par la galvanoplastie : moule en creux et médaille reproduite en relief.

Les procédés que nous venons de décrire s'appliquent tels quels à la reproduction des médailles, des cachets, de toutes les pièces de petites dimensions dont une face seule est gravée. On les utilise aujourd'hui pour la reproduction des planches gravées sur bois, sur acier ou sur cuivre, planches qui s'altèrent ou s'usent assez rapidement, quand on les soumet à un tirage direct, et dont la galvanoplastie permet de conserver indéfiniment les types.

Un bois gravé donne au maximum un tirage de dix mille épreuves. Voici comment on en reproduit autant de clichés qu'on voudra, pouvant servir à l'impression. On commence par métalliser la surface du bois avec de la plombagine, puis on

prend une empreinte avec la gélatine ou la gutta-percha. On soumet le moule ainsi obtenu et métallisé à l'action galvanoplastique; une couche de cuivre s'y dépose en reproduisant avec la plus grande fidélité les moindres traits de la gravure. Au bout d'un temps qui ne dépasse guère vingt-quatre heures, l'épaisseur de la feuille métallique atteint un vingtième de millimètre; ce n'est pas assez pour offrir une résistance à l'action des presses typographiques, mais on renforce la plaque en coulant sur le revers un alliage de plomb et d'antimoine (composition des caractères d'imprimerie). Puis on le redresse, on enlève les bavures, on le monte sur bois, et le cliché ainsi obtenu est prêt à servir au tirage. Il peut supporter alors, sans déformation ni altération, l'impression de quatre-vingt mille exemplaires. Quant au type gravé sur bois, il reste absolument intact et peut fournir indéfiniment des clichés semblables.

Un procédé analogue permet de reproduire des planches gravées sur cuivre ou sur acier; d'ordinaire l'empreinte elle-même s'obtient par l'opération galvanoplastique, et, avec ce moule, on opère de façon à reproduire la planche type. Il y a seulement, pour éviter l'adhérence, une précaution à prendre : c'est d'exposer la planche, avant de la mettre dans le bain, aux vapeurs d'iode. C'est ainsi, par exemple, qu'on procède pour l'impression des timbres-poste. On réunit deux ou trois cents empreintes ou matrices du type de la gravure, et l'on obtient de la sorte des planches permettant l'impression de feuilles répétant le même nombre de timbres. On comprendra l'utilité de cette multiplication du type primitif, quand on saura qu'en France on tire chaque jour un million et demi de timbres-poste. Pour éviter les contrefaçons, que les reports sur pierre rendraient faciles, le papier sur lequel sont tirés les timbres est enduit d'une encre blanche de sûreté qui se trouverait reportée sur la pierre lithographique comme les traits du dessin : à l'impression, on n'obtiendrait plus qu'une tache uniforme recouvrant toute la feuille.

C'est à l'aide de la galvanoplastie que M. Smee a fabriqué

les clichés permettant l'impression typographique des billets de la Banque d'Angleterre. Pour donner une idée de la résistance de ces clichés, nous citerons les lignes suivantes du mémoire où ce savant physicien rend compte des procédés employés pour cette reproduction. « L'électro-cuivre, dit-il, est d'une telle durée, qu'on peut à peine assigner la limite au delà de laquelle il est hors d'usage; et au journal le *Times*, on assure qu'un moulage de ce genre a déjà fourni un tirage de vingt millions sans être complétement usé. Jusqu'à présent on n'a pas encore atteint la limite de la durée des électro-moulages pour l'impression des billets de la Banque, et l'on a déjà imprimé au delà d'un million de billets sans effet bien sensible. »

En France, M. Hulot a aussi employé la galvanoplastie à la reproduction et à l'impression des billets de banque émis en 1848; puis à celle des figures des cartes à jouer.

Si la galvanoplastie rend les plus signalés services à l'impression des gravures de divers genres, elle n'est pas moins utile à la correction des planches gravées : par exemple à l'introduction de détails nouveaux dans les cartes géographiques ou topographiques. Ces modifications sont indispensables dans les grandes publications telles que la grande Carte de France de l'état-major : rectification des routes, addition de routes nouvelles, de chemins de fer, de canaux, de travaux industriels, etc., tout cela n'était possible que par des procédés de retouche, de refoulage au marteau qui risquaient d'endommager les planches types. M. Georges a imaginé une méthode de correction par laquelle ces graves inconvénients sont évités. On enlève au grattoir les parties à modifier; on y fait, en prenant les précautions nécessaires, un dépôt de cuivre par la galvanoplastie. Puis on plane avec soin; on prend une épreuve où les parties à modifier viennent en blanc; les dessinateurs tracent les nouvelles lignes qui, reportées sur la planche, sont alors livrées au graveur.

On sait combien il importe, dans les impressions chromotypographiques, d'avoir un repérage rigoureux pour le tirage

des planches de diverses couleurs. La galvanoplastie permet d'obtenir une justesse parfaite pour le repérage des planches de ce genre. L'Imprimerie nationale a pu ainsi tirer en couleur de nombreuses cartes, et notamment la grande Carte géologique de France, qui est elle-même basée sur le tracé de l'état-major pour tout ce qui regarde la partie topographique.

Mais la galvanoplastie ne permet pas seulement de reproduire des planches identiques aux planches gravées : elle est appliquée à la gravure directe, dans le genre de la taille-douce ou de l'eau-forte. Seulement alors ce n'est plus par un dépôt métallique, et la plaque sur laquelle est tracé le dessin à reproduire, au lieu d'être placée dans le bain au pôle négatif, est disposée comme anode soluble. En effet, sa surface étant recouverte d'une mince couche de vernis isolant, et le dessin tracé à la pointe ayant mis à nu le métal, ce dernier est attaqué par l'action électrolytique ; il se creuse de la même manière que dans le procédé à l'eau-forte, et la gravure se trouve faite, sans que l'opérateur ait à redouter l'action nuisible des émanations nitreuses.

Les procédés Duclos, Gillot, Garnier, pour la gravure en relief sur cuivre et sur zinc, sont aussi basés en partie sur la galvanoplastie ; mais les détails des opérations nécessitées par ces procédés sont trop minutieux pour que nous puissions les reproduire ici : ils nous entraîneraient, d'ailleurs, en dehors de notre sujet.

Disons maintenant quelques mots des applications de la galvanoplastie à la reproduction des objets en ronde bosse, des bustes, des statues, des vases, chapiteaux et autres ornements d'architecture.

Le principe est toujours le même. Seulement la reproduction de pièces de grandes dimensions offrait, à l'origine, des difficultés qu'on a heureusement surmontées. Il s'agissait surtout d'éviter l'inégalité d'épaisseur des dépôts dans les diverses parties du moule, et en même temps d'obtenir partout une

épaisseur qui donnât à l'objet d'art reproduit une solidité suffisante. Supposons un moule de statue, dont les parties sont rapprochées de manière à former le creux qu'occupait le modèle avant le moulage. La question est d'obtenir, sur toutes les parois intérieures, un dépôt de cuivre égal



Fig. 417. — Disposition du moule pour la galvanoplastie en ronde bosse.



Fig. 418. — Vase reproduit par la galvanoplastie.

et régulier. On avait d'abord employé une anode soluble, qu'on plaçait à l'intérieur du moule; la dissolution rapide de cette anode ne donnait qu'un dépôt inégal et d'une épaisseur insuffisante. M. Lenoir imagina d'employer une anode insoluble, constituée par des fils de platine contournant toutes les parties du moule sans le toucher. Des cristaux de sulfate de cuivre, renfermés dans une poche de gutta-percha percée de trous,

fournissaient le cuivre nécessaire à la reconstitution de la dissolution, à mesure que le dépôt l'épuisait; mais c'était un moyen coûteux et dès lors applicable seulement aux petits objets. M. Planté eut l'idée de remplacer le platine par le plomb : on introduit dans le moule un noyau de plomb percé de trous, reproduisant grossièrement la forme du moule un peu plus petite, de façon à laisser entre le noyau et les parois un intervalle convenable.

La figure 417 montre, dans une des moitiés du moule qui a servi à la reproduction galvanoplastique du vase de la figure 418, comment est disposé le noyau de plomb dont il s'agit. Grâce au procédé dont nous venons de donner une idée, le moulage des plus belles et des plus grandes œuvres de la statuaire est devenu possible : des statues de 2 mètres de hauteur, et même de 4 mètres et demi, destinées à la nouvelle salle de l'Opéra, ont été moulées par l'électricité avec une perfection que ne pouvait dépasser l'ancien art du fondeur. Une statue de 9 mètres, pesant 3500 kilogrammes, a été faite de la même façon. L'épaisseur du cuivre n'est pas moindre de $4^{mm},5$; mais il n'a pas fallu moins de deux mois et demi pour mener à fin cette opération. Ces travaux remarquables ont été exécutés par une de nos grandes maisons industrielles, la maison Christofle et Cie. On doit à M. Oudry la reproduction galvanoplastique en cuivre des bas-reliefs qui composent la colonne Trajane : ces bas-reliefs, au nombre de six cents, ont chacun en moyenne une superficie d'un mètre carré. On voit, par l'importance de ce travail, que l'art galvanoplastique, si remarquable par la fidélité et la perfection de ses produits, est devenu, entre les mains de nos savants et de nos fabricants, une véritable et grande industrie.

§ III — ÉLECTRO-CHIMIE — DORURE ET ARGENTURE GALVANIQUES

Le principe sur lequel reposent les méthodes de dorure, d'argenture, et en général de dépôt d'un métal sur la surface d'un objet en couche mince adhérente, est le même que celui de la galvanoplastie proprement dite : c'est toujours la propriété électrolytique d'un courant voltaïque, lequel, en traversant une dissolution d'or, d'argent..., la décompose et transporte le métal au pôle négatif.

Mais, le principe connu, il restait des difficultés pratiques à vaincre : il fallait déterminer les conditions d'adhérence du dépôt, trouver la meilleure composition du bain, le meilleur mode de préparation des objets à recouvrir, etc. Nous avons vu que c'est à MM. Elkington et Ruolz que sont dus les premiers procédés véritablement industriels de dorure et d'argenture.

Les appareils employés, composés ou simples, sont les mêmes que nous avons décrits en galvanoplastie. La préparation de l'objet consiste principalement dans le décapage de la surface, laquelle doit être parfaitement dépouillée de toute substance étrangère. Si l'objet est de bronze, on lui fait subir un recuit au rouge sombre. S'il est de laiton, on le lave dans une dissolution de soude concentrée; mais il reste toujours alors une légère couche d'oxyde qu'on fait disparaître par le dérochage, opération qui consiste dans une immersion de l'objet au sein d'un bain acide. Enfin, si l'objet à dorer ou à argenter est de fer, d'acier, de zinc, d'aluminium, il faut le recouvrir préalablement, par la galvanoplastie, d'une légère couche de cuivre, sans quoi l'or ou l'argent déposé à sa surface ne serait pas adhérent.

Maintenant il s'agit de préparer le bain. Pour la dorure, c'est une dissolution de cyanure d'or dans un excès de cyanure de potassium; pour l'argenture, sa composition est toute semblable:

c'est une dissolution de cyanure d'argent dans un excès de cyanure de potassium. Il est bon que la température du bain pendant l'opération soit maintenue à un degré assez élevé, à 70° d'ordinaire : à froid, la couleur du dépôt serait moins belle. On met au pôle positif une lame d'or ou une lame d'argent, par laquelle le courant entre dans la dissolution, et qui sert d'anode soluble. L'objet à dorer ou à argenter forme le pôle négatif. Dès que l'action électrolytique est commencée, le cyanure d'or se décompose, l'or est transporté au pôle négatif, où il recouvre peu à peu toute la surface de l'objet; mais le cyanogène, en se



FIG. 419. — Argenture galvanoplastique : appareil composé.

rendant au pôle positif, s'y combine avec l'or, et du cyanure d'or se reforme en même quantité que le courant en décompose. Le titre de la dissolution ne change donc pas, condition essentielle de l'opération. Les phénomènes sont tout à fait semblables au sein du bain d'argent.

Les figures 419 et 420 montrent comment sont disposés les appareils composés de dorure ou d'argenture. Une grande cuve de bois, dont les parois sont enduites intérieurement de gutta-percha, reçoit le bain. Les objets y sont suspendus à des tringles de cuivre posées sur un châssis métallique qui communique avec le pôle négatif de la batterie électrique. Un autre châssis isolé du premier porte des tringles auxquelles sont suspendues les lames d'or ou d'argent formant les anodes solubles.

La force du courant doit être réglée de manière à donner un dépôt parfaitement adhérent. L'épaisseur de la couche déposée dépend d'ailleurs de la durée de l'opération. En pesant préalablement les pièces décapées avant de les mettre au bain, en faisant une nouvelle pesée après leur sortie, on se rend un compte exact du poids du métal précieux déposé, de l'épaisseur de la dorure ou de l'argenture.

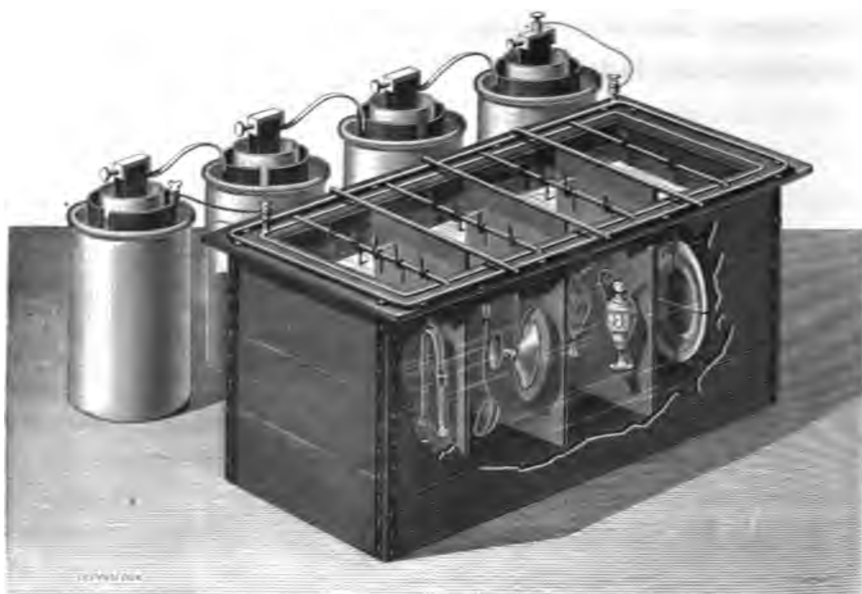


Fig. 420. — Appareil composé pour la dorure ou l'argenture galvanoplastiques.

On peut, du reste, employer un appareil qui règle automatiquement la durée de l'opération, toutes les fois qu'on veut déposer sur les objets à recouvrir un poids fixé d'avance du métal précieux, or ou argent. Cet appareil, imaginé par M. Roseleur, n'est autre qu'une balance disposée comme l'indique la figure 421.

A gauche, on voit l'appareil placé au-dessous du fléau, de manière que les objets à dorer ou à argenter soient supportés par ce dernier, lorsqu'ils plongent dans le bain. Une tringle horizontale, fixée à la colonne de la balance, porte d'un côté

l'anode soluble qui plonge dans le bain, et communique de l'autre avec le pôle positif de la pile. L'autre fléau porte un double bassin : dans le bassin supérieur, on place une tare qui produit l'équilibre et maintient le fléau horizontal. Dans cette

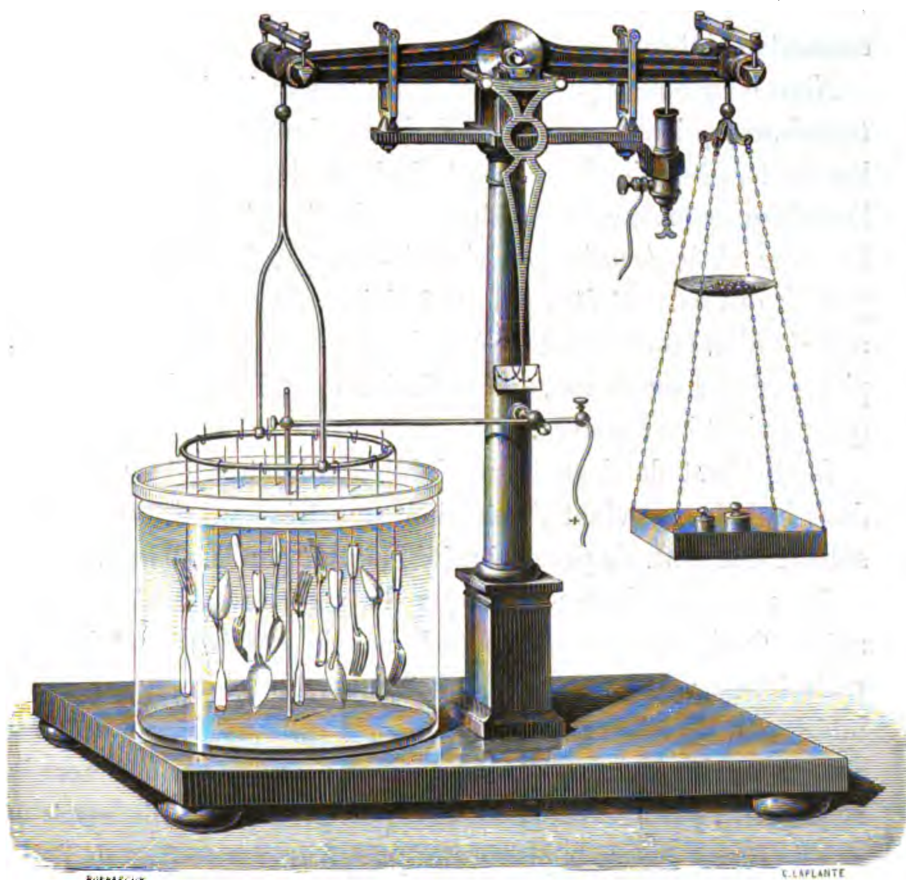


FIG. 421. — Balance Roseleur pour l'argenture ou la dorure galvanoplastiques.

position, le courant ne passe pas, attendu que les tringles portant les objets qui doivent former le pôle négatif ne communiquent pas avec la pile. Mais si l'on place alors dans le second bassin de la balance les poids marqués formant le poids du métal précieux qu'on veut déposer sur les objets immergés, l'équilibre est rompu, le fléau penche vers la droite ; une pointe métallique

dont il est muni plonge dans un godet rempli de mercure relié au pôle négatif de la pile, et dès lors le circuit est fermé : l'opération commence.

L'opération dure, sans surveillance, tant que le dépôt n'a pas atteint l'excès de poids déterminé; mais aussitôt que cette limite va être dépassée, l'équilibre se rétablit, le contact cesse, et le courant est interrompu.

Nous n'entrerons pas dans le détail des opérations purement techniques qui suivent le dépôt de la couche d'or ou d'argent sur les objets, dès qu'on les a retirés du bain. Disons seulement que la couleur mate de cette couche est rendue brillante par le *gratteboessage* et le *brunissage*, c'est-à-dire par le frottement des parties qui doivent être polies, à l'aide d'une brosse de laiton animée d'un mouvement rapide de rotation, puis au moyen de pierres dures ou de morceaux d'acier montés sur des manches que manient les ouvriers.

Le brillant de l'argenture s'obtient directement en plaçant dans le bain, pendant l'opération, une très-petite quantité de sulfure d'argent. Ce procédé a été imaginé par M. Planté.

La méthode électro-chimique d'argenture et de dorure est aujourd'hui, dans tous les pays du monde, appliquée sur la plus vaste échelle; elle a permis l'introduction, dans les plus modestes intérieurs, d'un luxe de bon aloi, qui est en même temps un auxiliaire de la propreté, puisqu'une foule d'objets usuels acquièrent, par le revêtement de métal précieux dont l'électrochimie les recouvre, la précieuse qualité de l'argent ou de l'or : l'inaltérabilité. Mais en même temps l'humanité y a trouvé son compte, car l'abandon des anciens procédés de dorure au mercure soustrait ainsi de nombreux ouvriers à l'influence délétère des émanations mercurielles. Enfin, une quantité considérable de métaux précieux, immobilisés auparavant dans l'orfévrerie massive, ont été rendus à la circulation.

Pour donner une idée de l'importance que cette industrie a prise seulement en France, citons ces lignes des *Grandes Usines* de M. Turgan :

« Quelques chiffres pris au hasard, dit-il, donneront une idée de l'importance acquise par l'électro-métallurgie dans la maison Christofle, qui n'est plus seule depuis l'expiration des brevets Elkington. Il a été argenté (1865) 5 600 000 couverts, qui ont retiré de la circulation 33 600 kilogrammes d'argent valant 6 700 000 francs. Une pareille quantité de couverts exécutés en argent massif aurait fait disparaître de la circulation un million de kilogrammes d'argent, c'est-à-dire plus de 200 millions de numéraire. 33 600 kilogrammes d'argent, à l'épaisseur adoptée pour les couverts, c'est-à-dire à 3 grammes par décimètre carré, couvriraient une superficie de 112 000 mètres carrés. »

La dorure et l'argenture galvaniques sont appliquées aujourd'hui dans une multitude de circonstances, par exemple aux ornements ciselés dont sont ornés les meubles. La variété des effets qu'on obtient en faisant ce qu'on nomme des *réserves*, c'est-à-dire en dorant certaines parties des objets, en argentant les autres, en employant ici l'or vert, là l'or rouge, etc., a permis d'introduire dans l'ornementation des meubles de luxe une richesse vraiment remarquable. Comme les réserves peuvent être creusées à une épaisseur aussi grande qu'on veut, et remplies de métaux de toutes sortes, la richesse dont nous parlons n'exclut pas la solidité.

L'or et l'argent ne sont pas les seuls métaux appliqués par l'électricité en couches adhérentes. On sait aujourd'hui obtenir des dépôts de platine, de laiton, d'étain, d'acier, de nickel, en employant des dissolutions convenables de ces métaux. Pour le platine, c'est une dissolution de phosphate double de platine et de soude. On étame les objets de fer dans un bain de pyrophosphate de soude et de protochlorure d'étain. On étame aussi galvaniquement le plomb et le zinc.

Une importante application de la galvanoplastie est celle qui consiste à aciérer les planches gravées sur cuivre. La surface de ces planches acquiert ainsi une dureté qui les préserve au tirage de toute altération. Dès que la mince couche d'acier ainsi déposée

s'use et laisse voir la teinte rouge de la planche sous-jacente, un nouvel aciérage prévient une altération ultérieure.

Pour terminer cet exposé sommaire des applications des propriétés électrolytiques des courants, parlons d'une industrie



FIG. 422. — Meuble artistique orné d'incrustations obtenues par la galvanoplastie.

récente, basée sur les mêmes procédés, et qui a pris entre les mains de son inventeur, M. Oudry, des développements considérables. Il s'agit du cuivrage des objets de grandes dimensions, vases, statues, candélabres, etc. Parmi les difficultés pratiques à vaincre, nous ne mentionnerons ici que celle qui concernait

l'opération fondamentale, c'est-à-dire l'adhérence du dépôt de cuivre sur des pièces que leurs dimensions ne permettaient pas de préparer, de décaper avec le soin minutieux des objets d'orfèvrerie. Se borner à recouvrir la surface d'une couche de plombagine eût été absolument insuffisant. L'acidité des bains eût attaqué les surfaces métalliques bien avant que le dépôt eût pris l'épaisseur convenable. M. Oudry les recouvre donc préalable-



FIG. 423. — Atelier de cuivrage galvanoplastique de l'usine Oudry.

ment d'un enduit isolant inattaquable aux acides, qui est appliqué au pinceau, après un nettoyage et des retouches à la lime et au burin dans les parties de l'ornementation qui les exigent. Cet enduit, à base de benzine, une fois sec, la pièce est plombaginée extérieurement et recouverte d'une pâte terreuse non conductrice, partout où le cuivrage ne doit pas être appliqué. On la plonge alors dans l'un des appareils, ou grandes cuves, qui contiennent les bains (fig. 423). Au bout de cinq ou six jours, l'épaisseur du dépôt atteint un millimètre, et l'opération est terminée. Il ne reste plus qu'à donner au cuivrage l'appa-

rence du bronze, ce qui se fait en frottant la surface avec une brosse trempée dans une solution d'acétate de cuivre et d'ammoniaque.

Les candélabres de la ville de Paris, les fontaines monumentales de la place Louvois et de la place de la Concorde, les portes extérieures du nouvel Opéra, nombre d'ornements métalliques d'architecture, ont été cuivrés par ce procédé, qui substitue des objets beaux et durables aux anciens modèles de fonte, que la peinture ne préservait pas de la rouille et de la destruction. L'industrie électro-métallurgique, par les services de tout genre qu'elle peut rendre aux autres industries, est indubitablement appelée à un grand avenir.

CHAPITRE X

APPLICATIONS DIVERSES DE L'ÉLECTRICITÉ

---

§ I — L'Électricité médicale

Avons-nous donné la description ou seulement épuisé la liste de toutes les applications de l'électricité? Il s'en faut de beaucoup : nous avons dû nous restreindre aux plus importantes, à celles qui sont le plus généralement adoptées. Notre but, d'ailleurs, qu'on se le rappelle, était surtout de mettre en relief les phénomènes physico-électriques de divers ordres et les lois de leur manifestation.

Nous ne terminerons pas cependant ce livre sans mentionner encore un certain nombre d'applications scientifiques, qui paraissent appelées à un grand développement : tel est l'emploi de l'électricité en médecine, et celui des appareils enregistreurs électriques destinés aux observations météorologiques continues.

Il ne nous appartient nullement, on le comprendra, d'apprécier en elle-même la valeur thérapeutique et médicale de l'électricité. Ce qui est incontestable, c'est que cet agent produit des effets physiologiques, des sensations plus ou moins vives, des commotions ou secousses nerveuses dont on a cher-

ché à tirer parti depuis longtemps en médecine. On employa d'abord les décharges de l'électricité statique, la bouteille de Leyde ; mais c'est surtout depuis les découvertes de Galvani et de Volta que le mode d'action des courants électriques a été étudié, et qu'on a pu en faire une sérieuse application au traitement de diverses maladies.



Fig. 424. — Éléments de la pile ou chaine de Pulvermacher.



Fig. 425. — Fonctionnement de la chaine galvanique de Pulvermacher.

Les appareils électro-médicaux sont tantôt des piles d'une construction particulière, tantôt des machines d'induction disposées, en général, de façon à permettre d'employer à volonté, et suivant le cas, des courants induits de divers ordres.

Parmi les piles, la *chaîne de Pulvermacher* est la plus généralement adoptée. Les figures 424 et 425 indiquent comment est formée cette pile et de quelle manière elle fonctionne. Chaque élément se compose d'un rouleau de bois dont la surface est creusée en gorges hélicoïdales. Deux fils métalliques, l'un de cuivre, l'autre de zinc, s'enroulent autour de ces rainures sans se toucher, et leurs bouts s'unissent, d'un élément à l'autre,

du zinc au cuivre, et réciproquement. Le tout forme une sorte de chaîne terminée par deux armatures que le malade tient à la main, ainsi que le montre la figure 425.

Pour faire fonctionner la chaîne de Pulvermacher, on la plonge dans un vase contenant du vinaigre étendu d'eau : le liquide imbibe le bois ; l'action chimique de l'acide sur le zinc produit le courant, qui se trouve fermé par les membres et le corps de l'expérimentateur.

Quand on veut obtenir des secousses, il faut interrompre le courant. Une disposition ingénieuse permet des interruptions successives. L'une des armatures contient, à l'intérieur, un rouage d'horlogerie qui fait mouvoir une roue dont une dent vient presser, à chaque tour, sur un ressort. Le contact de la pile avec la paroi de l'armature cesse à ce moment, et le courant se trouve interrompu. On peut régler d'ailleurs la rapidité des interruptions et rendre les secousses plus ou moins rapprochées.

Les appareils électro-médicaux fondés sur l'induction ne se distinguent pas les uns des autres par leurs effets ; mais on peut les classer, comme le fait M. Le Roux[1], en deux catégories, selon la nature de la force primitive que l'on met en œuvre. Dans la première, ce savant range les appareils dans lesquels on dépense de la force mécanique pour produire un courant induit, auquel on fait induire ensuite son propre circuit, ou un autre voisin. Ces appareils sont fondés sur le mouvement relatif d'un circuit et d'un aimant : on les appelle *magnéto-électriques*. Les appareils dans lesquels on demande à une action électro-chimique le courant qui doit induire son propre circuit, ou un autre voisin, forment la seconde classe, et M. Le Roux les appelle appareils *rhéo-électriques*. Les appareils de Pixii et de Clarke, que nous avons décrits dans les *Phénomènes de la physique*, appartiennent à la première classe, et la bobine de Ruhmkorff à la seconde. Voici (fig. 426) un appareil portatif

1. *De l'induction et des appareils électro-médicaux.*

de ce dernier genre, dû au même constructeur, et qui est principalement usité dans la pratique civile.

La pile génératrice de l'électricité est formée de deux éléments à bisulfate de mercure, qu'on voit à droite de la figure. Le courant est lancé dans une double bobine, et, de là, passe par les rhéophores aux deux armatures, qu'on voit rangées dans la boîte et que l'expérimentateur prend à chaque main. Les interruptions du courant sont produites par un interrupteur ou trembleur de Neef. Enfin, la graduation dans l'énergie du courant et, par suite, dans celle des secousses, se fait de la manière

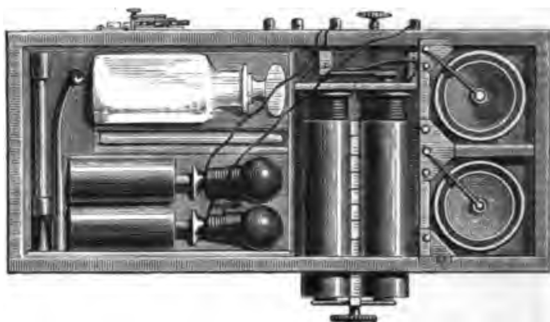


FIG. 426. — Appareil électro-médical d'induction de Ruhmkorff.

suivante. On peut voir, sur la figure, que chaque bobine est enveloppée d'une chemise de cuivre qu'on peut, à l'aide d'une vis extérieure, faire mouvoir, de manière à grandir ou à diminuer à volonté la longueur des parties des bobines recouvertes par ces sortes de manchons. Des courants induits se développent dans le cuivre extérieur aux bobines; et, comme ces courants sont de sens contraires à ceux qui parcourent les fils des hélices, ils se neutralisent en partie. On peut donc commencer les expériences par des courants d'abord très-faibles, puis de plus en plus forts, jusqu'au maximum d'énergie, qui a lieu quand les bobines sont entièrement mises à découvert.

MM. les docteurs Duchenne (de Boulogne), Tripier, et divers constructeurs, MM. Gaiffe, Trouvé, Siemens et Halske, etc., ont imaginé des appareils électro-médicaux dans la description

desquels il serait trop long d'entrer, notre but étant seulement de donner une idée de cette application spéciale de l'électricité.

§ II — L'Électricité appliquée aux observations météorologiques

La météorologie est une science qui, sous beaucoup de rapports, est encore dans l'enfance, et cela ne paraîtra point étonnant à ceux qui se rendent compte de la complexité infinie des phénomènes dont elle se propose d'étudier les lois. Les éléments de ces phénomènes sont multiples : pression atmosphérique, température des couches d'air à diverses hauteurs, températures du sol et des eaux, hygrométrie, force et direction des vents, quantité de pluie tombée, sont autant de données qu'il s'agit de recueillir sur le plus grand nombre de points possible du globe terrestre, et qui exigent des observateurs, pour en enregistrer toutes les variations, une assiduité des plus laborieuses, des plus pénibles. Aussi les savants qui se vouent à cette tâche sont-ils généralement obligés de se restreindre à l'observation des instruments, à des heures déterminées du jour et de la nuit, d'où résultent inévitablement des lacunes fâcheuses.

On a cherché, depuis longtemps, à remédier à cette insuffisance des moyens d'observation, en imaginant des instruments qui laissent la trace automatique de leurs indications, et ainsi rendent inutile l'intervention immédiate ou directe de l'observateur. Les thermomètres à maxima et à minima sont des exemples de ces sortes d'instruments ; mais ils ne servent qu'à donner des indications d'éléments singuliers, isolés : ils ne résolvent nullement la question, autrement importante, d'un enregistrement continu ou à périodicité très-courte, qui donnerait par exemple la courbe des variations de la température.

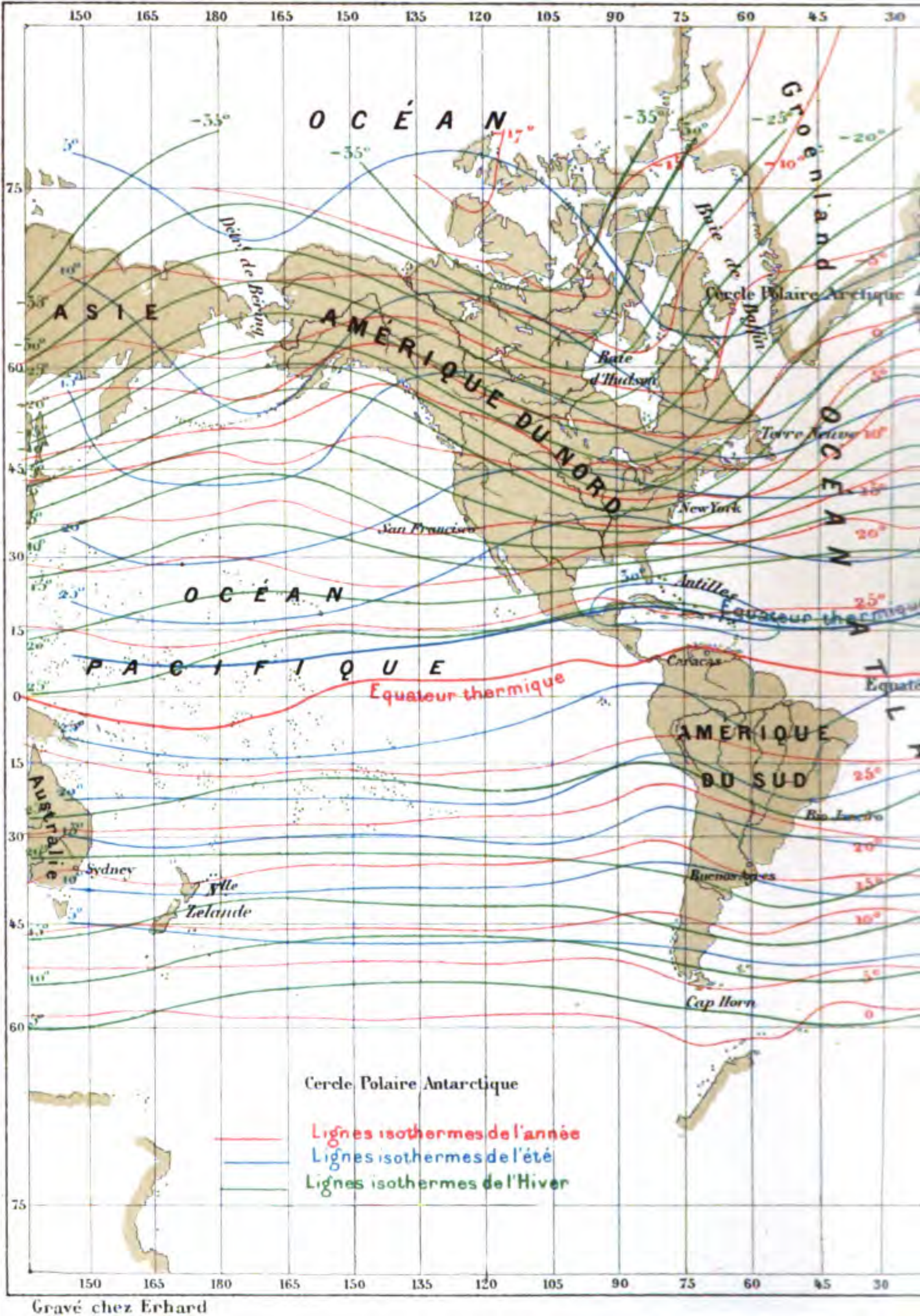
L'idée de substituer des enregistreurs automatiques aux instruments de physique ordinaires n'est pas nouvelle. Dès 1782, Magellan avait imaginé un *météorographe perpétuel*, mais il ne paraît pas qu'il l'ait mis en pratique. Le principe de cet appareil était purement mécanique, c'est-à-dire qu'il empruntait au mouvement même, causé par les variations des éléments, la force nécessaire à l'enregistrement des indications. Beaucoup d'appareils enregistreurs ont été et sont encore fondés sur ce principe, qui a le mérite de la simplicité et de l'économie, mais qui, malheureusement, pèche par insuffisance, à cause du peu d'intensité de la force ainsi utilisée.

Un autre système consiste à employer la photographie, c'est-à-dire à faire reproduire sur papier sensible l'image, amplifiée à l'aide d'un appareil optique convenable, du niveau des colonnes mercurielles du baromètre, du thermomètre, etc. Ce système est naturellement plus coûteux que le système mécanique, d'autant plus qu'il est nécessaire d'y joindre un rouage d'horlogerie, pour imprimer un mouvement continu à la bande de papier sur laquelle se font les indications photogéniques.

Enfin, il y a un troisième système qui consiste à employer l'électricité comme agent enregistreur : les appareils télégraphiques, notamment ceux des systèmes écrivants ou imprimeurs, suffisent à faire concevoir de quelle manière sont employés les courants électro-magnétiques, pour l'enregistrement des indications météorologiques. Par exemple, les index des instruments se trouvent munis d'aiguilles qui pénètrent dans une bande de papier sans fin, toutes les fois qu'elles sont mises en mouvement par les armatures d'électro-aimants, ce qui arrive quand il y a fermeture ou interruption du circuit électrique : une horloge règle la périodicité de ces fermetures, en même temps que son rouage fait avancer le papier où se fait l'enregistrement.

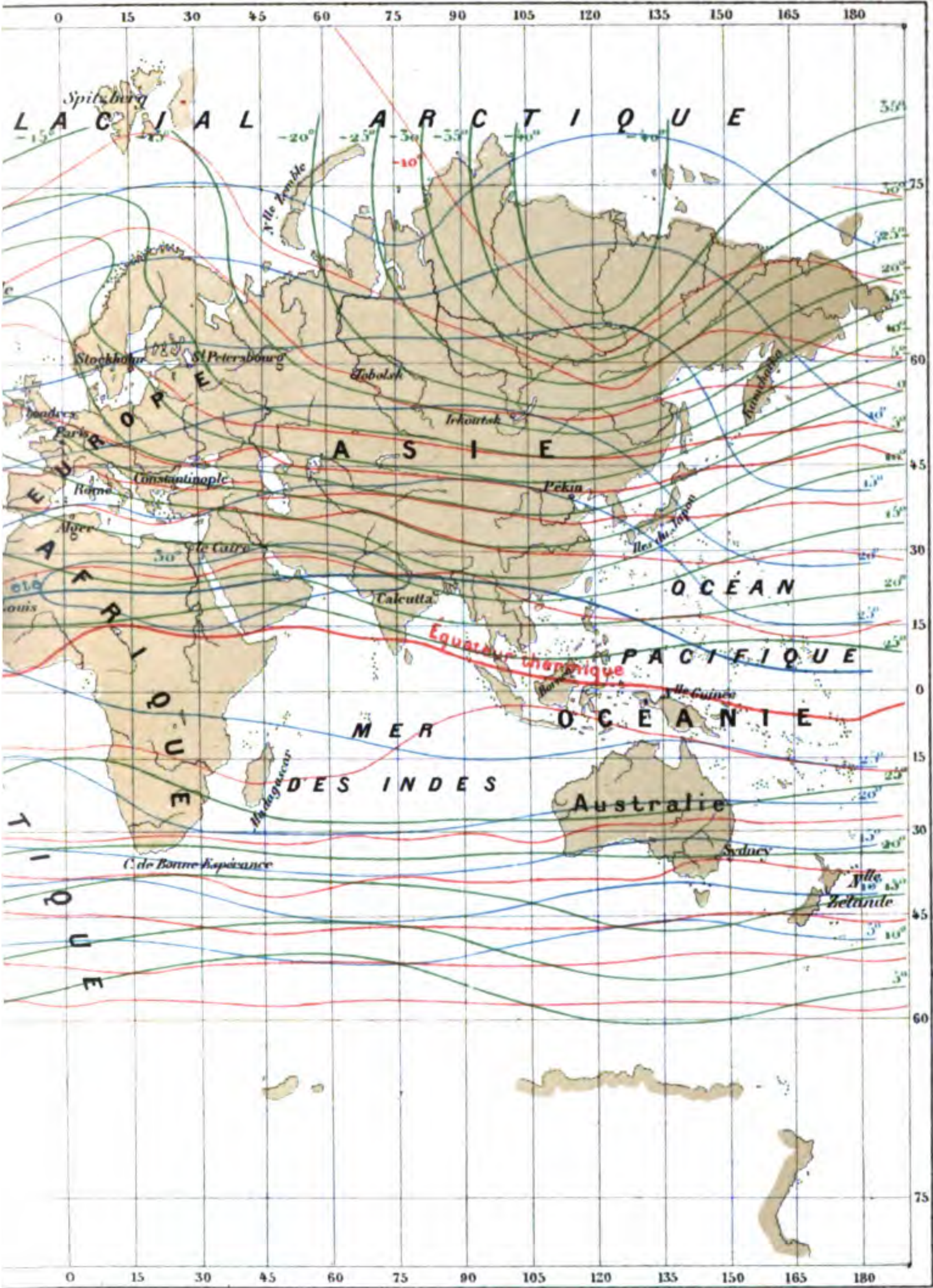
Citons quelques-uns des instruments enregistreurs électro-magnétiques employés dans les observations de météorologie.

Le premier *anémographe* construit en France a été imaginé



LA CHALEUR A LA SURF

LIGNES



E DU GLOBE TERRESTRE

THERMES

par M. Du Moncel, puis modifié par M. Salleron, et enfin introduit par le P. Secchi dans la grande machine météorographique que ce savant avait exposée au Champ de Mars en 1867.

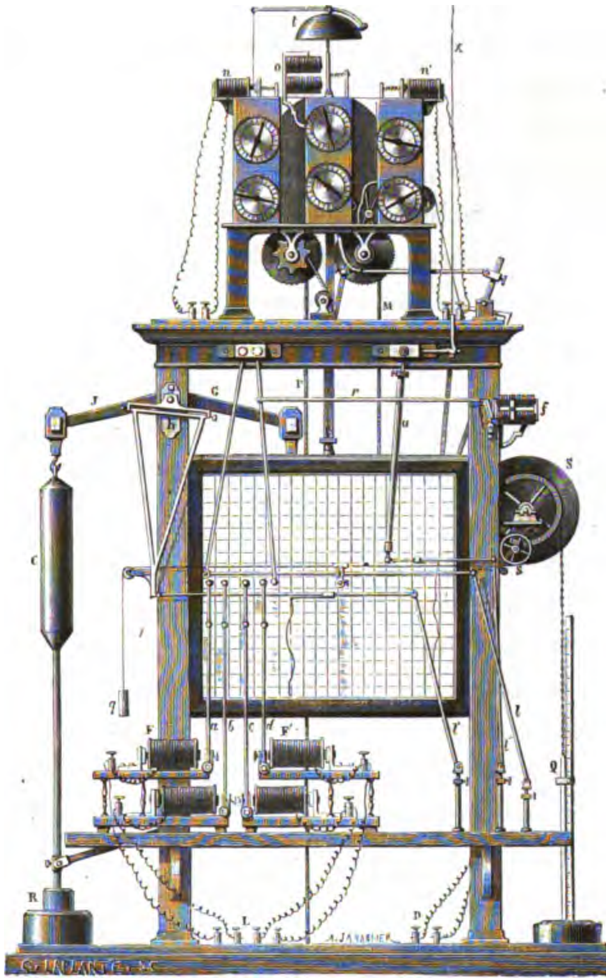


FIG. 427. — Météorographe Secchi.

L'anémomètre proprement dit est formé d'une girouette, pour donner la direction du vent, et d'un moulinet de Woltmann pour en indiquer la vitesse. Un commutateur azimutal, divisé en huit secteurs isolés les uns des autres, est en relation, par huit fils qui aboutissent à chaque secteur, d'une part avec le

même pôle de la pile, d'autre part avec l'appareil récepteur. Sur ce commutateur, appuie constamment un frotteur à piston qui est dirigé suivant l'axe de la girouette, établissant sans cesse, entre cet axe et les secteurs, un contact métallique intime. L'axe étant d'ailleurs en communication avec l'autre pôle de la pile, il en résulte que le circuit est toujours fermé à travers le secteur sur lequel appuie le frotteur, c'est-à-dire précisément dans la direction du vent. Une communication électrique analogue a lieu entre le moulinet, la pile et l'appareil récepteur. Celui-ci est un cylindre qui est mû par un mouvement d'horlogerie, d'une manière uniforme, de façon à faire une révolution sur lui-même en douze heures et à avancer d'une quantité constante, sur son axe, de 2 millimètres, par exemple, à chaque révolution. Huit électro-aimants, dont les armatures sont pourvues de crayons, sont disposés au devant du cylindre, et, toutes les fois que le circuit de l'un d'eux est fermé, le crayon correspondant trace sur le cylindre, à la surface duquel le mouvement de l'armature l'appuie, un trait dont la longueur indique la durée du vent en même temps que sa direction.

Le nombre des tours accomplis par le moulinet est indiqué d'une façon analogue, et, par suite, la vitesse du vent se trouve régulièrement enregistrée.

L'espace nous manque pour décrire avec les détails nécessaires, les barométrographes, les thermométrographes et autres instruments météorologiques enregistreurs, dont la construction est basée sur l'intervention de l'électricité. Il nous suffit ici d'avoir donné une idée générale de cette application, et nous terminerons en insistant sur l'importance que cette méthode d'observation ne peut manquer d'avoir pour les progrès de la science. Divers systèmes sont pratiqués aujourd'hui dans les principaux observatoires météorologiques : à Kew, à Greenwich, à Bruxelles, à Rome, à Berne, à Paris. Le jour où des stations du même genre seront disséminées sur tout le globe, dans les continents et les îles, et où le relevé d'observations exactes, continues et embrassant de longues années, pourra se

faire avec le soin nécessaire, on pourra établir des formules de plus en plus rigoureuses pour représenter les lois des mouvements de l'atmosphère et des autres phénomènes dont l'enveloppe aérienne du globe est le siége.

Déjà maintenant certaines données peuvent être représentées d'une façon générale, et marquer les variations des éléments météorologiques, suivant les lieux. Nous avons donné dans la planche XX les lignes qui figurent, en direction et en intensité, la distribution du magnétisme à la surface de la terre. Dans la planche XXV, on trouvera les lignes isothermes de l'année, celles des saisons hivernales et des saisons estivales. On nomme *isotherme*, la courbe des lieux où la température moyenne de l'année est égale ; l'*isothère* est celle des points où la température moyenne du mois le plus chaud est partout la même ; l'*isochimène* est l'isotherme du mois le plus froid. Toutes ces moyennes de température sont calculées et réduites pour une altitude égale à celle du niveau de la mer ; mais il ne faut pas oublier que l'altitude a une grande influence sur ces moyennes.

FIN

TABLE DES FIGURES

PLANCHES TIRÉES HORS DU TEXTE

FIGURES INSÉRÉES DANS LE TEXTE

FIN DE LA TABLE DES FIGURES

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE DEUXIÈME

ACOUSTIQUE — APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DU SON

LIVRE TROISIÈME

APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DE LA LUMIÈRE

LIVRE QUATRIÈME

APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DE LA CHALEUR

LIVRE CINQUIÈME

LE MAGNÉTISME ET L'ÉLECTRICITÉ

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES

PARIS. — IMPRIMERIE DE E. MARTINET, RUE MIGNON, 2

